

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
DE SUELO ADICIONADAS CON CONCRETO RECICLADO.

ALEXANDRA DANIELA ÁLVAREZ QUINTERO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA-BOYACA

2019

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN
PROBETAS DE SUELO ADICIONADAS CON CONCRETO RECICLADO.

ALEXANDRA DANIELA ÁLVAREZ QUINTERO

Informe de investigación presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Director: PhD. Msc. Esp. IC Oscar Javier Gutiérrez Junco

Codirector: IC. Osmar Albert Gamba Gómez

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA - BOYACA

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 15 de octubre de 2019

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado en primera instancia a Dios, sin él nada hubiese sido posible.

A mi madre Ana Cely Quintero Galvis y mi padre Fabio Álvarez Barragán por sus oraciones, palabras y esfuerzos en cada paso dado, cada victoria lograda y cada error cometido.

Agradecimientos

Mi mayor gratitud es con Dios, quien con su cariño y protección me ha guiado en cada etapa, ha puesto grandes personas en mi camino y jamás me ha dejado caer.

A mis padres por creer en mí siempre, por brindarme todo lo que han podido para llegar a esta meta.

A Oscar Rincón, por su persistencia, cariño y fe en este proyecto, gestor de motivación y apoyo a lo largo de esta etapa.

Agradezco al Ingeniero Oscar Javier Gutiérrez director de esta investigación, por creer en el proyecto y abrir puertas que permitiesen darle continuidad en la búsqueda de lograr el objetivo.

Al ingeniero Osmar Gamba codirector de esta investigación, agradecimiento especial y profundo a su labor profesional y apoyo como persona, el cual fue primordial en el desarrollo de este proceso.

De igual manera, agradecimientos a la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

A mis docentes, en especial al Ingeniero Joselyn Torres, quien con su enseñanza y confianza me permitió dar un gran paso en mi crecimiento como profesional.

Resumen

El estudio del suelo como material de construcción se ha enfocado en casos particulares, principalmente en sistemas constructivos tradicionales como el adobe, la tapia o el bahareque, sin embargo, existe poca información acerca de la adición de otros compuestos a este material.

El objeto principal de esta investigación fue evaluar el comportamiento a la compresión simple en probetas de suelo adicionadas con concreto reciclado. La metodología aplicada se dividió en cuatro fases: la primera comprende la caracterización física del suelo y el concreto reciclado; en la segunda fase se empleó el software especializado en selección de materiales CES-EDUPACK-GRANTA para definir un material de mejoramiento de las materias primas teniendo en cuenta el estado del arte y algunos parámetros como la compatibilidad, economía y facilidad de adquisición; la tercera fase comprende la fabricación de moldes en acero para la elaboración de las probetas y el procesos de curado de las mismas; la cuarta fase se subdivide en la determinación de la mezcla base y la mezcla óptima a partir de 18 ensayos de resistencia a compresión simple.

En esta investigación se le denomina *mezcla base* a la combinación porcentual de tierra mejorada (M1, M2 o M3) que proporcione mayor resistencia a la compresión simple. Este criterio es el mismo para determinar la mezcla óptima, compuesta por la mezcla base más los porcentajes añadidos de concreto reciclado (M4, M5 o M6).

Posterior a la realización de los 18 ensayos se determinó que el concreto reciclado no es un componente de aporte a la resistencia a compresión simple, contrario a esto, y en

dependencia del porcentaje añadido de concreto la resistencia a compresión puede disminuir hasta un 50%

Palabras clave- Suelo, concreto reciclado, resistencia a la compresión simple, mezcla base, mezcla óptima.

Abstract- The study of the ground as a construction material has focused on particular cases, mainly in traditional construction systems such as adobe, tapia or bahareque, however, there is not information enough about this material yet.

The main purpose of this research was developed in order to evaluate the behavior of simple compression in specimens of ground added with recycled concrete. The methodology applied was divided into four phases: the first includes the physical characterization of the soil and recycled concrete; in the second phase, the specialized software in the selection materials of CES-EDUPACK-GRANTA was used to define a material for the improvement of raw materials taking into account the state of the art and some parameters such as compatibility, economy and ease of acquisition; the third phase includes the manufacture of molds in steel for the preparation of the specimens and the curing processes thereof; The fourth phase is subdivided into the determination of the base mix and the optimal mix from 18 single compression resistance tests.

In this investigation, the improved ground percentage combination (M1, M2 or M3) that provides greater resistance to simple compression is called the base mix. This criterion is the same to determine the optimal mix, consisting of the base mix plus the added percentages of recycled concrete (M4, M5 or M6).

After the completion of the 18 tests, it was determined that the recycled concrete is not a component of contribution to the simple compressive strength, contrary to this, and depending on the percentage of concrete added the compressive strength can decrease up to 50%

Keywords- Ground, recycled concrete, simple compressive strength, base mix, optimal mix.

Contenido

1.Introducción	17
2.Justificación.....	18
3.Objetivos	19
3.1. Objetivo general.....	19
3.2. Objetivos específicos	19
4.Marco teórico	20
4.1. Ensayos organolépticos in-situ.....	20
4.2. Ensayos manuales in-situ	21
4.2.1. Ensayo de adhesión.....	21
4.2.2. Ensayo de retracción.....	22
4.2.3. Ensayo de cuchillo.....	22
4.2.4. Ensayo de cilindro o rollo.....	22
4.3. Ensayos en laboratorio.....	23
4.3.1. Ensayo de granulometría.	23
4.3.2. Ensayo límite líquido.....	23
4.3.3. Ensayo limite plástico.....	24
4.3.4. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.	25
4.3.5. Ensayo resistencia a la compresión simple.....	26
4.4. Sistemas constructivos en tierra.....	26
4.4.1. El adobe. 27	
4.4.2. Bloque tierra comprimida – BTC.	28
4.4.3. Tapia pisada o tapial.	29
4.5. Residuos de construcción y demolición –RCD	30
5.Estado del arte	33

6. Metodología	37
6.1. Muestreo de la materia prima.....	37
6.2. Caracterización del suelo.....	39
6.2.1. Ensayo de humedad natural.....	39
6.2.2. Ensayo de granulometría.....	40
6.2.3. Ensayo de límite líquido.....	41
6.2.4. Ensayo de límite plástico.....	43
6.2.5. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.....	45
6.3. Determinación de mezcla base y óptima	48
6.3.1. Componentes y su dosificación.....	48
6.3.2. Fabricación de moldes.....	50
6.3.3. Fabricación de probetas.....	53
6.3.4. Proceso de curado.....	56
7. Resultados	58
7.1. Ensayos de caracterización	58
7.1.1. Ensayo de humedad natural.....	58
7.1.2. Ensayo de granulometría.....	59
7.1.3. Ensayo límites de consistencia.....	62
7.1.4. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.....	64
7.2. Selección material de mejoramiento.....	65
7.3. Compactación y curado de los especímenes mezcla base (M1, M2 y M3) y mezcla óptima (M4, M5 y M6).....	71
7.4. Ensayo de compresión uniaxial no confinado.....	73
7.4.1. Ensayo de resistencia mecánica a la compresión simple en especímenes de mezcla 1, 2 y 3.....	75

7.4.2. Ensayo de resistencia mecánica a la compresión simple en especímenes de mezcla 4, 5 y 6.....	80
8. Conclusiones.....	86
9. Bibliografía.....	89
Anexo 1: gráfica ces edupack Relación de materiales modulo arquitectura. Densidad (kg/m ³) vs esfuerzo a compresión (MPa).....	94
Anexo 2: gráfica ces edupack. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al agua (kg/m ³) vs módulo de cortante (GPa).....	95
Anexo 3: gráfica ces edupack. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al ambiente rural (kg/m ³) vs módulo de cortante (GPa).....	96

Lista de tablas

Tabla 1. Distribución porcentual de los Componentes Mezcla Base (M1, M2 y M3) ...	49
Tabla 2. Distribución porcentual de los componentes mezcla óptima (M4, M5 y M6) .	50
Tabla 3. Resultado del ensayo de humedad natural. A) Humedad natural a muestra de suelo. B) Humedad natural a muestra de concreto reciclado.	58
Tabla 4. Resultado del ensayo de granulometría de la muestra suelo.	59
Tabla 5. Resultado del ensayo de granulometría de la muestra de concreto reciclado. ...	61
Tabla 6. Resultados de límites de consistencia del suelo.	63
Tabla 7. Resultados del ensayo modificado de compactación para mezcla 1.	64
Tabla 8. Resultados del ensayo modificado de compactación para mezcla 2.	65
Tabla 9. Resultados del ensayo de espectrómetro de fluorescencia de rayos X de Diatomácea pulverizada.	71
Tabla 10. Datos de la variación de peso y humedad en especímenes de mezcla 1, 2 y 3 durante el proceso de curado (21 días).	72
Tabla 11. Datos de la variación de peso y humedad en especímenes de mezcla óptima M4, M5 y M6 durante el proceso de curado (21 días).	73
Tabla 12. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 1	75
Tabla 13. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 2	77
Tabla 14. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 3	79
Tabla 15. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 4	81
Tabla 16. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 5	82
Tabla 17. Resultados ensayo a compresión axial mezcla 6	84

Lista de gráficas

Gráfica 1. Curva de distribución de partículas o curva granulométrica de la muestra de suelo. Autoría propia (2019).	60
Gráfica 2. Curva de distribución de partículas o curva granulométrica de la muestra de concreto reciclado. Autoría propia (2019).	62
Gráfica 3. Relación de materiales densidad (kg/m^3) vs esfuerzo a compresión (MPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.	67
Gráfica 4. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al agua (kg/m^3) vs módulo de cortante (GPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.	68
Gráfica 5. Relación de materiales módulo arquitectura. Resistencia al ambiente rural (kg/m^3) vs módulo de cortante (GPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.	69
Gráfica 6. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P1, P2 y P3 de mezcla 1 (arena gruesa 5%, arena media-fina 65%, arcilla 30%). Autoría propia (2019).	76
Gráfica 7. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P4, P5 y P6 de mezcla 2 (arena gruesa 0%, arena media-fina 75%, arcilla 25%). Autoría propia (2019).	78
Gráfica 8. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P14, P15 y P16 de mezcla 3 (arena gruesa 0%, arena media-fina 65%, arcilla 35%). Autoría propia (2019).	80
Gráfica 9. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P24, P25 y P27 de mezcla 4 (arena media-fina 37.5%, arcilla 12.5%, concreto 50%). Autoría propia (2019).	82
Gráfica 10. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P21, P22 y P23 de mezcla 5 (arena media-fina 52.5%, arcilla 17.5%, concreto 30%). Autoría propia (2019).	83

Gráfica 11. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P17, P18 y P19 de mezcla 6 (arena media-fina 67.5%, arcilla 22.5%, concreto 10%). Autoría propia (2019).

..... 85

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Suelo implementado como materia prima. Laboratorio de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019)	37
Ilustración 2. Localización zona extracción de suelo. Google earth (2019)	38
Ilustración 3. A) cilindros de concreto f'c 4000 psi. B) Trituradora de mandíbula. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	38
Ilustración 4. Proceso de tamizado de la materia prima (suelo). Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019)..	41
Ilustración 5. Proceso del ensayo de límite líquido. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	43
Ilustración 6. Proceso del ensayo de límite plástico. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	44
Ilustración 7. Patrón de impactos para la compactación de las capas de material (Método A) INVIAS. INV-142- 13. Fig. 142.....	46
Ilustración 8. A) Adición del contenido de agua con un atomizador. B) Material enrasado a la altura del molde cilíndrico. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).....	47
Ilustración 9. Mezcla 1, 2 y 3 posterior al mezclado con arcilla diatomea. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	49
Ilustración 10. Láminas en acero para molde N°1. Elaboración propia (2019).....	51

Ilustración 11. Espécimen fracturado por pandeo de láminas durante compactación en molde N°2. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).....	51
Ilustración 12. Molde N°3 recubierto internamente con pintura anticorrosiva. Elaboración propia (2019).....	52
Ilustración 13. Proceso de humedecimiento y mezclado para la fabricación de especímenes. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).....	53
Ilustración 14. A) molde en acero y lámina de polipropileno. B) llenado del molde y compactado manual del material en 5 capas. C) preparación y centro de vástago para aplicación de carga. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).....	54
Ilustración 15. A) Aplicación de para compactación. B) Espécimen desencofrado. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	56
Ilustración 16. A) Recubrimiento del espécimen desencofrado con vinipel para proceso de curado 7 días. B) Proceso de curado 14 días, especímenes al aire libre protegidos del sol y la lluvia. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).....	57
Ilustración 18. Especímenes posteriores a la falla del ensayo a compresión axial. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).	75

1. Introducción

En todo tipo de estructuras civiles se encuentran elementos trabajando a compresión y a flexo-compresión como lo son los muros o columnas de una vivienda. En esta investigación se evaluó la resistencia a compresión simple por medio de ensayos de laboratorio realizados en la Máquina Universal a probetas de suelo con y sin adición de concreto reciclado, a fin de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos mínimos de resistencia de la tierra usada como material de construcción.

En este documento se enmarca la construcción en tierra como una solución alterna de bajo impacto ambiental en relación con otros tipos de sistemas como el concreto armado.

La característica principal de las construcciones en tierra es que sus procesos son empíricos y autóctonos, variables según la región y por ende del personal que la ejecute. Es por lo anterior, que en términos técnicos existen incertidumbres del proceso constructivo, la estabilidad y las buenas prácticas para poder utilizarse como un sistema masivo. Así bien, se ejecutó la investigación con el enfoque del método científico, entendiéndose este como el proceso donde se determinó y dio control a cierta cantidad de variables para proceder a realizar la experimentación en laboratorio.

2. Justificación

En la actualidad, Colombia asume la responsabilidad de enmarcarse dentro de los diecisiete objetivos del desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2019) en donde se considera que las áreas que requieren medidas de mayor urgencia son el cambio climático y la desigualdad entre y dentro de los países, para combatir esto, es necesario cambiar hacia una energía no contaminante e incrementar el acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene.

Como afirma Ramírez (2015) “la construcción sostenible se puede definir como aquella que, teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales”. Además, al ser el suelo un recurso de fácil acceso y bajo costo, permite el desarrollo constructivo en cualquier lugar, resultando esencial en poblaciones vulnerables donde facilita la construcción de viviendas dignas, lo que consecuentemente mejora la calidad de vida de las comunidades.

La importancia de esta investigación radica en la evaluación de nuevos elementos a ser usados con fines estructurales, por medio de la determinación y análisis de la capacidad de respuesta del material en términos de resistencia mecánica a la compresión de mezclas de suelo adicionadas con concreto reciclado.

A su vez los dos principales enfoques son el reciclaje y la revalorización del uso de los materiales naturales como elementos de aporte en el desarrollo autosostenible de la construcción.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar la resistencia mecánica a compresión simple en probetas de suelo adicionadas con concreto reciclado.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar ensayos de caracterización física a la materia prima (suelo y concreto reciclado).
- Seleccionar el material a ser implementado para el mejoramiento de las propiedades del suelo por medio del software CES.EDUPACK.
- Realizar moldes cúbicos para la fabricación de probetas de suelo.
- Definir las composiciones porcentuales de las mezclas y realizar los ensayos de compresión simple correspondientes.
- Analizar los datos experimentales y teóricos obtenidos de la investigación para definir la mezcla óptima.

4. Marco teórico

El suelo o tierra simple como material de construcción se caracteriza por ser una masa que al humedecerse adquiere plasticidad y facilidad de moldeo debido a su contenido de arcilla, luego al secarse se endurece alcanzando resistencias considerables a compresión.

La norma peruana E.080 de diseños y construcción con tierra reforzada, define la tierra como “aquel material compuesto de cuatro componentes básicos: arcillas, limo, arena fina y arena gruesa”. Es importante que antes de realizar cualquier tipo de estructura en este material se conozca su granulometría, plasticidad, densidad máxima, resistencia a la compresión y cohesión.

Existen dos formas de identificar los suelos: identificación in-situ e identificación en laboratorio.

4.1. Ensayos organolépticos in-situ

El suelo como material natural puede ser descrito a partir de ciertas características físicas de distinción sensorial como por ejemplo la textura, el olor, el color o el sabor.

Según Hernández (2016) se tienen las siguientes características para los suelos:

- ✓ *Olfato*: el desprendimiento de mal olor de una muestra de suelo se puede asimilar con materia orgánica en exceso.
- ✓ *Gusto (ensayo de mordedura)*: los materiales arenosos presentan una sensación disgregada en la boca; los materiales arcillosos presentan una sensación plástica y pegajosa.

- ✓ *Tacto (lavado de manos)*: Al humedecer la muestra, los materiales limosos presentan una sensación áspera moderadamente cohesiva; los materiales arenosos no presentan ningún tipo de cohesión y los materiales arcillosos producen una sensación de plastilina.
- ✓ *Visual*: la visión provee dos parámetros para inferir el tipo de material, el primero es el tamaño de partículas y el segundo es el color.

Un indicativo para determinar características generales de la composición de un suelo es su color, sin embargo, hay que tener en cuenta que la humedad contenida puede generar alteraciones en el tono. Los tonos oscuros o negros generalmente pertenecen a materia orgánica. Los tonos claros o blancos se asimilan con carbonatos, yesos o sales solubles. Los tonos pardos o amarillos están relacionados con óxidos de hierro unidos a las arcillas. Los tonos rojizos son materiales con presencia de óxidos férricos. Los colores grises verdosos contienen compuestos ferrosos y arcillas saturadas. En un suelo arenoso los granos o partículas son apreciables con facilidad y no presentan cohesión, por otra parte, un material arcilloso presenta fisuración o agrietamiento fácilmente.

4.2. Ensayos manuales in-situ

4.2.1. Ensayo de adhesión.

En este ensayo se introduce una espátula en una masa de suelo húmedo. Si se requiere esfuerzo al introducir la hoja y después de sacarla quedan adheridas partículas a esta, se habla de un material arcilloso. Por el contrario, si no se requiere esfuerzo y las partículas no se adhieren se habla de un material arenoso.

4.2.2. Ensayo de retracción.

En este ensayo se debe colocar en una caja de madera engrasada, una muestra de suelo compactada dejando un espacio al extremo sin llenar, en el proceso de curado la muestra debe durar al sol 3 días o 7 días en la sombra. Una vez seca la muestra se mide el hueco que falta por llenar, la máxima retracción admisible para muros exteriores es de 1.6% de su sección transversal o 2 milímetros.

4.2.3. Ensayo de cuchillo.

Se debe realizar una pelota con la masa de tierra, posteriormente se corta por la mitad con un cuchillo, si la superficie interna es de color opaco o mate es un material limoso. Si la superficie externa es brillante es un material arcilloso.

4.2.4. Ensayo de cilindro o rollo.

Se debe realizar un cilindro humedecido de diámetro de 1 cm y aplastarlo en forma de rollo hasta alcanzar un diámetro aproximado de 5 mm, posteriormente se mantiene colgado con los dedos hasta que se dé su quiebre y caiga, según el largo del trozo desprendido tendremos:

- Muy arcilloso: 15 – 30 cm
- Arcilla en un 50%: 5-15 cm.
- Pobre en arcillosa: < menor a 5cm.

4.3. Ensayos en laboratorio

4.3.1. Ensayo de granulometría.

El objetivo de este ensayo es determinar cuantitativamente la distribución del tamaño de las partículas que componen los agregados finos y gruesos a través del proceso de tamizado. Su importancia radica en obtener la propiedad que permita correlacionar la gradación de las partículas con los requisitos específicos que se tengan para cada fin de producción.

El procedimiento general consiste en preparar una muestra representativa por vía seca, se realiza un análisis por tamizado ya sea de manera manual o mecánica. La masa mínima de suelo requerida para el análisis de estas fracciones se encuentra en función del tamaño máximo de partícula.

En este ensayo se debe calcular:

- El porcentaje total de material que pasa cada tamiz.
- El porcentaje total del material retenido en cada tamiz.
- El porcentaje retenido en cada tamiz consecutivo.
- El módulo de finura como la suma de los porcentajes acumulados en la serie normalizada de tamices: N°100, N°50, N°30, N°16, N°8, N°4, 9.5mm, 19.0mm y 37.5mm

4.3.2. Ensayo límite líquido.

El objetivo de este ensayo es determinar la consistencia relativa relacionada con el contenido de humedad y el estado líquido o plástico del suelo. Su importancia radica en

la clasificación de los suelos al ser una propiedad índice de los mismos, además, junto con el límite plástico e índice de plasticidad se pueden establecer correlaciones que determinen comportamientos como la compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, entre otros.

El procedimiento general consiste en determinar mediante tanteos una fracción representativa de la muestra, la cual se esparce sobre una cazuela de bronce y se divide en dos mitades con un ranurador, permitiendo que estas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada.

En este ensayo se debe calcular:

- El contenido de agua.
- La curva de fluidez que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes, se dibuja en el gráfico semilogarítmico con el contenido de agua ordenada en la escala aritmética y el número de golpe en la escala logarítmica. La curva de fluidez es una línea recta promedio que pasa tan cerca como sea posible de los tres puntos dibujados.
- El contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes se toma con límite líquido del suelo y se redondea al número entero más cercano.

4.3.3. Ensayo límite plástico.

El objetivo de este ensayo es determinar la consistencia relativa relacionada con el contenido de humedad y el estado plástico y semisólido del suelo. Su importancia radica

en la clasificación de los suelos al ser una propiedad índice de los mismos, además junto con el límite plástico e índice de plasticidad se pueden establecer correlaciones que determinen comportamientos como la compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, entre otros.

El procedimiento general consiste en utilizar el mismo material implementado en el ensayo de límite líquido y a partir de este, determinar el límite plástico e índice de plasticidad, realizando rollos de suelo moldeados sobre una placa de vidrio hasta que su diámetro alcance 3.2 mm y se parta en varios trozos. El material se coloca en un recipiente y se repite el procedimiento con otra fracción de material. Se determina el contenido de humedad de las dos muestras.

Este ensayo solo es aplicable a la fracción de suelos que pasa el tamiz No 40, es por este motivo que se debe considerar la contribución relativa de este porcentaje al total de la muestra, si en estas hubiese granulometrías por encima.

4.3.4. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.

El objetivo de este ensayo es determinar la relación entre la humedad óptima y el peso unitario seco máximo de los suelos mediante la curva de compactación. Su importancia radica en determinar el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para que el suelo alcance un comportamiento satisfactorio en términos de resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad y compresión.

El procedimiento general consiste en tomar una muestra de suelo con una humedad de moldeo seleccionada arbitrariamente, se coloca en 5 capas dentro de un molde sometiendo cada capa a 25 de un martillo de 44.48 N que cae desde una altura de 457.2

mm produciendo una energía de compactación aproximada de 2700 kN-m/m. Se determina el peso unitario seco resultante del procedimiento. Se repite con un número suficiente de humedades de moldeo para establecer una curva que relacione estas con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos, a esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo para el ensayo normal de compactación.

Este ensayo solo es aplicable a suelos con 30% o menos de su masa con tamaño mayor a 19 mm y que no hayan sido compactados previamente, es decir, no se acepta la reutilización de un suelo compactado.

4.3.5. Ensayo resistencia a la compresión simple.

El objetivo de este ensayo es determinar los esfuerzos de rotura para medir la resistencia a compresión del suelo que corresponde a la carga axial máxima que se puede aplicar en determinada área sin superar los límites máximos de deformación permitida.

4.4. Sistemas constructivos en tierra

Existen diferentes tipos de sistemas constructivos, la elección de cada uno está basado en la cultura constructiva, el clima, el tipo de suelo, las herramientas y materiales a disposición, entre otros factores. A continuación, se expone información general y relevante de los sistemas más usados en Latinoamérica.

4.4.1. El adobe.

Este sistema está compuesto por ladrillos o adobes fabricados mediante el moldeo de una mezcla de tierra de consistencia plástica no prensada. El proceso constructivo es similar a la pared de mampostería convencional de ladrillo y sus dimensiones generales son de 30*15*7.5 cm. Sus elementos (adobes) se pueden utilizar para fabricación de muros portantes, arcos, bóvedas y cúpulas. Esta técnica es usada preferiblemente en climas secos.

La mezcla de tierra se moldea con agua y es opcional la inclusión de fibras vegetales o estiércol para controlar las fisuras por retracción que se presentan normalmente. El tipo de tierra recomendada para esta técnica es areno-arcillosa con bajos porcentajes de limo para lograr una mayor adhesión y cohesión.

El procedimiento general de fabricación consiste en lograr una mezcla limpia con la tierra preferentemente seca, se pasa por un tamiz de 5*5 mm de apertura. Una vez obtenida la tierra deseada se adicionan fibras vegetales (paja o cabello de caballo) en trozos de 5 a 10 cm o estiércol.

Se deja secar la mezcla realizada y se desmenuza antes de mezclar, posteriormente se vierte agua y se mezcla durante tres o cuatro días, varias veces al día con el objetivo de hidratar la arcilla, deshacer terrones y crear una masa lo más homogénea y plástica posible.

Al momento de la fabricación de los bloques se debe lubricar el molde y posicionar la mezcla de suelo en el interior de este, procurando llenar las esquinas sin aplicar presión, consecutivamente se enrasa y desmolda la mezcla. Según Hernández (2013), el proceso de curado se genera colocando al sol los bloques entre dos y tres semanas. Se deben

descartar los bloques que tengan las siguientes anomalías: (1) vacíos en las esquinas; (2) diferencia en dimensiones mayor a 5%; (3) fisuración con profundidad mayor a 5mm.

Una de las maneras de evaluar la mezcla es al paso de cuatro semanas, si los adobes presenten grietas es necesario añadir más fibras vegetales a la mezcla, por otro lado, si los bloques no resisten el peso de un hombre es necesario agregar una mayor proporción de arcilla a la mezcla.

4.4.2. Bloque tierra comprimida – BTC.

Este sistema consiste en bloques de tierra sin cocer, fabricados mediante la compactación o prensado de una mezcla de suelo moldeada con agua y regularmente adicionada con estabilizante.

La adición de estabilizantes como cemento, cal o asfalto, mejora los parámetros de resistencia a compresión del BTC, además mejora su resistencia a la abrasión y el medioambiente. El tipo de suelo recomendado para esta técnica es areno-arcillosa cuyo porcentaje de arena debe ser superior al 50% y el porcentaje de estabilizantes añadidos puede variar entre el 5 al 10% en función de la resistencia requerida. Hay que tener en consideración que la arena aporta resistencia al bloque y la arcilla aporta cohesión con bajos porcentajes de limo para lograr una mayor adhesión y cohesión, sin embargo, cuanto más porcentaje de arcilla, más habrá que estabilizar el suelo, ya que la arcilla es responsable del efecto de retracción y fisuración del material durante el proceso de secado del espécimen.

El proceso constructivo es similar a la pared de mampostería convencional de ladrillo y sus dimensiones generalmente son de 29*14.5*9.5 cm. El procedimiento general de fabricación consiste en lograr una mezcla limpia con la tierra preferentemente seca, se

pasa por un tamiz de 5*5 mm de apertura. Una vez obtenida la tierra deseada se adiciona agua hasta obtener una humedad de moldeo óptima. Se coloca la mezcla dentro de la prensa hasta quedar a tope y se procede a su compactación. Se extrae el BTC en una superficie plana y lisa, en un área protegida del sol, viento y lluvia.

El proceso de curado inicia después de 6 horas de moldeados y durante los 7 primeros días los bloques deben ser mantenidos húmedos por medio de riegos sucesivos para continuar el proceso de hidratación del cemento lo que traerá una mayor resistencia al material.

4.4.3. Tapia pisada o tapial.

Esta técnica consiste en suelo amasado y apasionado en un encofrado para formar muros monolíticos. La mezcla de suelo se moldea con agua, generalmente es adicionada con estabilizantes como cemento cal o asfalto para mejorar la resistencia a compresión del BTC, a demás mejora su resistencia a la abrasión y el medioambiente.

El tipo de suelo recomendado para esta técnica es areno-arcillosa cuyo porcentaje de arena debe ser superior al 50% y el porcentaje de estabilizantes añadidos puede variar entre el 5 al 10% en función de la resistencia requerida. Hay que tener a consideración que la arena aporta resistencia al bloque y la arcilla aporta cohesión con bajos porcentajes de limo para lograr una mayor adhesión y cohesión, sin embargo, cuanto más porcentaje de arcilla más habrá que estabilizar el suelo, ya que la arcilla es responsable del efecto de retracción y fisuración del material durante el proceso de secado del espécimen.

El procedimiento general de fabricación consiste en lograr una mezcla limpia con la tierra preferentemente seca, se pasa por un tamiz de 5*5 mm de apertura. Una vez obtenida la tierra deseada se adiciona agua hasta obtener una humedad de moldeo óptima. Se coloca la mezcla dentro de la prensa hasta quedar a tope y procede a su compactación. Se extrae el BTC en una superficie plana y lisa, en un área protegida del sol, viento y lluvia.

4.5. Residuos de construcción y demolición –RCD

Según el Ministerios de medio ambiente y desarrollo sostenible (2017) en la resolución 0472 se define como RCD o residuos de construcción y demolición al material residual que se produce en procesos de construcción, excavación, demolición, renovación o ampliación de obras civiles. Los componentes típicos incluyen hormigón, asfalto, madera, metales, yeso, cerámicos o baldosas, tejas, ladrillos, vidrios.

Según su origen y fuente de generación de RCD, se clasifican en (Mercante, 2007):

- Materiales de limpieza de terrenos: matorrales, ramas, árboles.
- Materiales de excavación: es normalmente un residuo inerte, natural o artificial. En algunos casos no es un suelo virgen por la presencia de contaminantes. Son, en general, de naturaleza pétreo (tierra, rocas de excavación, materiales granulares).
- Residuos de obras viales: son compuestos por trozos de losas de hormigón de la construcción de caminos, residuos de asfalto y mezclas del pavimento asfáltico, puentes, renovación de materiales.
- Residuos resultantes de construcción nueva, de ampliación o reparación: Se

originan en el proceso de ejecución, reparación o ampliación. Se incluyen los que provienen de embalajes de los productos que llegan a la obra. Sus características y cantidad son variadas y dependen de la fase del trabajo y del tipo de obra (residencial, no residencial, comercial, industrial, institucional).

El último tipo de residuos es generado por diferentes tipos de obras, desde constructores de viviendas individuales a desarrollos comerciales generales, empresas de construcción en general, constructores de caminos y autopistas, pequeños contratistas de remodelaciones y especialistas en excavación, entre otras.

Según su naturaleza, se clasifican en:

- Residuos inertes: son los que no presentan ningún riesgo de contaminación del agua, del suelo y el aire. Así los define el Real Decreto Español 1481/2001: “aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana”. En definitiva, son plenamente compatibles con el medio ambiente.
- Residuos no peligrosos o no especiales: son los que pueden ser almacenados o tratados en las mismas condiciones que los residuos domésticos. La característica de no peligrosos es la que define sus posibilidades de reciclaje; de hecho, se reciclan en instalaciones industriales juntamente con otros residuos.

- Residuos especiales: son los que tienen características que los hacen potencialmente peligrosos, tales como sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, irritantes, cancerígenas.

La definición de RCD abarca a cualquier residuo que se genere en las actividades anteriormente listadas, exceptuando los siguientes: (1) Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas. (2) Los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición. Es el caso, por ejemplo, de los residuos de aceites industriales usados, de los residuos peligrosos en general, de los residuos de envases, de los neumáticos fuera de uso, de las pilas y baterías o de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

5. Estado del arte

Para la investigación se revisaron tres grupos de información. El primero se enfoca en la caracterización de residuos de concreto y su implementación en los diferentes materiales constructivos; el segundo se dirige hacia las construcciones en tierra, su tipología, procedimientos de evaluación y normativa al respecto; por último, se expone el avance en los procedimientos experimentales para la realización de ensayos en tierra y su acercamiento al análisis estructural.

En el 2003, Elisa Aguja y Ángela Hincapié realizaron una investigación donde se evaluó el comportamiento de un mortero de pega, elaborado con agregado proveniente de cilindros de hormigón. En este estudio se concluyó que la adición de agregado fino producto del concreto reciclado en el mortero de pega, disminuyó las propiedades mecánicas y de adhesión del mismo, sin embargo, esta reducción se mantuvo dentro de los rangos establecidos por las normas técnicas colombianas (NTC 3329, NTC 4050, NTC 3849)

De igual manera, en el 2006 Cruz, Cristian. y Masson, Orlando analizaron la factibilidad de producir unidades de mampostería adicionadas con agregados de residuos de la construcción. En esta investigación se determinaron las propiedades físicas de los agregados y propiedades mecánicas de las unidades de mampuestos mediante ensayos de compresión axial en pilas, tracción por flexión en vigas y compresión diagonal en muretes, en función al porcentaje de escombros. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que con los ensayos realizados se verificó el cumplimiento de los requerimientos de resistencia de acuerdo con las normas Americanas ASTM- “American

Society for Testing and Materials” (ASTM C1314-00, ASTM E512-00, ASTM E519-00).

Con base en los avances realizados, se puede inferir que los resultados de los ensayos mecánicos no siempre son superiores con la adición del agregado reciclado en comparación con el agregado convencional, sin embargo, estos materiales se mantienen dentro del rango de resistencia dado según las diferentes especificaciones técnicas.

Existen diferentes tipologías de la construcción en tierra, determinadas principalmente por las características y procesos de fabricación de los muros de carga. Dentro de los diferentes tipos, se encuentran los muros en adobe, muros en bahareque, muros de elementos textiles rellenos con tierra, muros en bloque de tierra cemento y muros en tapia pisada, entre otros.

Gernot Minke en 2001, autor del manual de construcción en tierra, proporciona un acercamiento a los conceptos de sismicidad, estabilidad de los elementos en las construcciones de tierra e información competente de las características y métodos de fabricación convencionales en los diferentes sistemas de construcción.

Por otra parte, se han realizado diferentes estudios para determinar las propiedades mecánicas de las mezclas de materiales en tierra, y de sus elementos en conjunto, con el fin de realizar acercamientos al comportamiento estructural.

En el 2008, B. Saroza, A. Rodríguez y M. Méndez estudiaron la resistencia a compresión simple de 12 tipos de suelos diferentes en la elaboración de adobe. Se concluyeron dos aspectos importantes para la distribución porcentual del agregado:

- El porcentaje de arcilla presente en la mezcla de suelo siempre debe ser superior al 15% para que la mezcla de adobe tenga una cohesión aceptable.
- Los especímenes que superaron 1MPa de resistencia a la compresión simple contaban con un contenido de arena superior al 50 %. En todos los casos estas mezclas se clasificaron como suelo “SC” según el sistema unificado de clasificación de suelos.

En el 2011 Oscar Gutiérrez, Oscar Medina y Karen Ortega analizaron el comportamiento del suelo como material constructivo de bloques en tierra comprimida. Se realizaron diferentes ensayos, entre los cuales están: compresión simple a BTS y muretes a escala; compresión diagonal en muretes a escala y determinación del módulo de elasticidad en probeta cilíndrica.

Luis Quiroz en 2011, evaluó el comportamiento de los materiales en tierra (adobe) mediante el software de análisis de elemento finito ADINA. En el proceso experimental se realizaron ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas del material. Se concluyó de manera determinante que para evaluar el comportamiento no lineal de estos materiales se requiere de mayores estudios que amplíen el rango de información, ya que los resultados obtenidos presentan gran variabilidad, principalmente los del ensayo de compresión diagonal. Se recomienda sobre todo realizar ensayos triaxiales con bajos esfuerzos de confinamiento.

Eric Herreras en 2016, realizó un estudio para evaluar el proceso de curado en elementos de tierra mediante la variación de las propiedades mecánicas según la exposición de las probetas en ambientes húmedos constantes durante un periodo de tiempo establecido. La

importancia de este documento se destaca en proporcionar un método experimental y control de parámetros durante esta etapa.

En el 2017, el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento de Perú publicó la norma E.080 de diseño y construcción con tierra reforzada. Esta norma contiene 5 capítulos, en los cuales se tratan los siguientes temas:

Capítulo 1: Disposiciones generales de las construcciones en tierra.

Capítulo 2: Consideraciones generales para la construcción de edificaciones de tierra reforzada.

Capítulo 3: Construcción de edificaciones de tapial reforzado.

Capítulo 4: Construcción de edificaciones de adobe reforzado.

Capítulo: Obras patrimoniales en tierra.

6. Metodología

La metodología expuesta es el resultado de procesos establecidos por normas como los ensayos de caracterización en laboratorio y procedimientos experimentales evaluados y realizados a partir de la investigación del estado del arte.

6.1. Muestreo de la materia prima

Para dar cumplimiento a esta investigación se utilizaron dos tipos de materias primas: suelo o tierra simple (Ilustración 1) y concreto reciclado (Ilustración 3A).

El suelo o tierra simple como material de construcción se caracteriza por ser una masa que al humedecerse adquiere plasticidad y facilidad de moldeo debido a su contenido de arcilla. Luego, al secarse se endurece alcanzando resistencias considerables a compresión.



Ilustración 1. Suelo implementado como materia prima. Laboratorio de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019)

Este material se adquirió en la ciudad de Tunja, Boyacá – Colombia. Su extracción se realizó en un lote ubicado en las coordenadas: latitud $5^{\circ} 34' 41.01''$ N, longitud $73^{\circ} 20' 14.10''$ (Ilustración 2), elevación 2758 msnm.

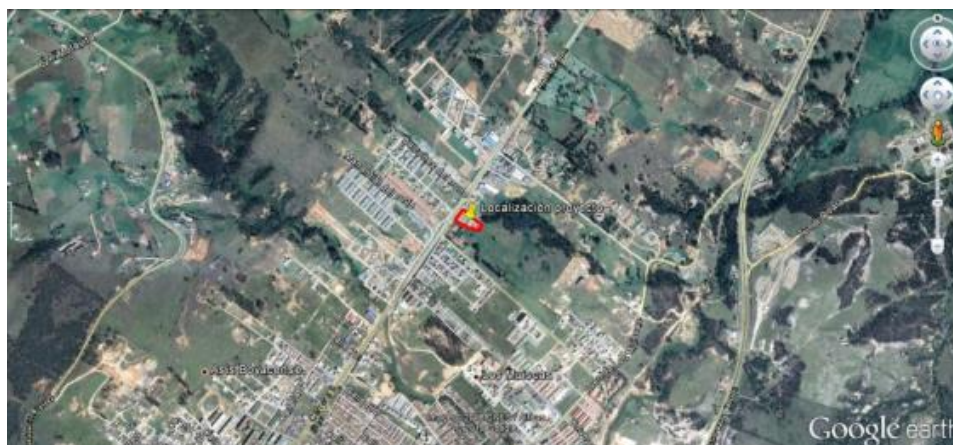


Ilustración 2. Localización zona extracción de suelo. Google earth (2019)

El concreto reciclado como materia prima y sus efectos reemplazando la arena son poco conocidos tanto en estado fresco como endurecido, adicionalmente, la necesidad de evaluar la disposición de residuos de construcción y sus posibilidades de reutilización dan una razón adicional para que la investigación este encaminada al análisis de comportamiento de este material en una masa de suelo.



Ilustración 3. A) cilindros de concreto $f'c$ 4000 psi. B) Trituradora de mandíbula. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

6.2. Caracterización del suelo

Se realizaron ensayos de caracterización a la materia prima para determinar su composición y comportamiento a fin de evaluar si se requería la adición o extracción de algún componente para lograr el mejoramiento del material en términos de resistencia a compresión.

6.2.1. Ensayo de humedad natural.

Se determinó la humedad natural de la tierra y el concreto reciclado bajo el siguiente procedimiento guiado por la norma INV E-122-13 determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado:

1. Se determinó y registró la masa de un recipiente limpio y seco (W_c).
2. Se seleccionó una un porcentaje representativo de la muestra y se colocó dentro del recipiente. Se determinó el peso del recipiente más la muestra húmeda (W_1).
3. Se colocó a secar el recipiente con el material húmedo en el horno a una temperatura de 110 °C. El tiempo de secado de la muestra fue 24 horas.
4. Se retira el recipiente del horno y se determina la masa del recipiente más muestra seca (W_2)

El porcentaje de agua contenida en la muestra se calculó a partir de:

$$W = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

W: Contenido de agua (%)

W1: Masa del recipiente con el espécimen húmedo (g):

W2: Masa del recipiente con el espécimen seco (g)

Wc: Masa del recipiente (g)

Ww: Masa del agua (g)

Ws: Masa de las partículas sólidas (g)

6.2.2. Ensayo de granulometría.

Se determinó la distribución de partículas del suelo y el concreto reciclado por medio del proceso de tamizado (Ilustración 4) bajo el siguiente procedimiento, guiado por la norma NTC-77 método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.

1. Se seleccionó una muestra de suelo y se secó en el horno durante 24 horas a una masa constante a una temperatura de 110°C.
2. Se seleccionó la siguiente distribución de tamices: N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200 los cuales proporcionan la información requerida.
3. Se determinó la masa de cada fracción retenida con una precisión del 0.1% de la masa seca total.



Ilustración 4. Proceso de tamizado de la materia prima (suelo). Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Se calculó:

- El porcentaje total de material que pasa cada tamiz.
- El porcentaje total del material retenido en cada tamiz.
- El porcentaje retenido en cada tamiz consecutivo.
- La gráfica de distribución de partículas.

6.2.3. Ensayo de límite líquido.

Se determinó la consistencia relativa relacionada con el contenido de humedad y el estado líquido de la tierra bajo el siguiente procedimiento guiado por la norma INV E-125-13 determinación del límite líquido de los suelos. La muestra para el ensayo se preparó por vía seca. Se implementó el método de ensayo A.

1. Se pulverizó y disgregó la muestra seleccionada sin causar fragmentación de las partículas individuales. Se tamizó el material separando el retenido del pasante por tamiz N°40.

2. Se repitió el ítem 1 al material retenido en tamiz N°40 hasta que el material retenido en el tamiz N°40 este únicamente compuesto por partículas individuales.
3. Se mezclaron 150 a 200 g del espécimen obtenido del ítem 2 con agua para que adquiere la consistencia requerida.
4. Se colocó una cantidad adecuada de la mezcla en la cazuela de bronce, comprimiéndola y nivelándola a 10 mm en su punto de mayor espesor.
5. La muestra de suelo se dividió con el ranurador, hundiendo el lado biselado de este hacia adelante en una línea desde el punto más alto hasta el más bajo de la cazuela.
6. Se procedió a levantar y golpear por caída la cazuela girando la manecilla a una velocidad de 1.9 a 2.1 rpm, hasta que las dos mitades de suelo se pusieron en contacto entre sí en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de 13 mm (Ilustración 5).
7. Se registró el número de golpes N, requerido para cerrar la ranura. De la muestra de suelo recién ensayada se tomó una fracción y se realizó el procedimiento para la toma de humedad.
8. Se realizó nuevamente el mezclado del material restante y se le adicionó agua suficiente hasta lograr un estado de mayor fluidez.
9. Se repitieron los ítems 3, 4, 5, 6 y 7 hasta lograr que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura de suelo se encontrase en cada uno de los siguientes intervalos: 25-35 golpes; 20-30 golpes; 15-25 golpes.

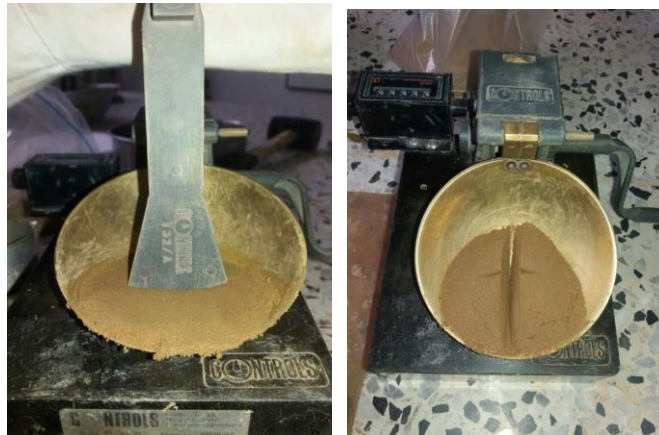


Ilustración 5. Proceso del ensayo de límite líquido. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Se calculó:

- El contenido de agua.
- Se realizó la curva de fluidez que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes, se dibuja en el gráfico semilogarítmico con el contenido de agua ordenada en la escala aritmética y el número de golpe en la escala logarítmica. La curva de fluidez es una línea recta promedio que pasa tan cerca como sea posible de los tres puntos dibujados.
- El contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes se tomó como límite líquido del suelo y se redondeó al número entero más cercano.

6.2.4. Ensayo de límite plástico.

Se determinó la consistencia relativa relacionada con el contenido de humedad y el estado plástico de la tierra bajo el siguiente procedimiento guiado por la norma INV E-

126-13 límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. El ensayo se realizó mediante el método manual.



Ilustración 6. Proceso del ensayo de límite plástico. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

- Se seleccionaron 2.0 gr de la fracción de suelo implementada en el ensayo del límite líquido.
- Sobre una placa de vidrio se hizo rodar la masa con la palma de la mano ejerciendo la presión necesaria para general un rollo uniforme de diámetro aproximadamente de 3.2 mm en un tiempo máximo 2 minutos.
- Cuando el rollo se dividió en trozos, se juntaron entre sí comprimiéndolos hasta formar una masa uniforme (se repitió el Ítem 2).
- Se recogieron las porciones de suelo fragmentado, se colocaron en un recipiente y se pesaron (Ilustración 6).
- Se repitieron los ítems 1, 2, 3 y 4 hasta que el recipiente contuvo 6 gr de suelo. De esta muestra se determinó el contenido de humedad.
- Los ítems 1, 2, 3, 4 y 5 se repitieron hasta obtener otro recipiente que contuviese 6 gr de suelo.

Se calculó:

- El límite plástico se obtuvo con el promedio de los contenidos de agua redondeándolos al entero más cercano. Nota: Si la diferencia entre los límites plásticos de los dos tanteos supera 1.4 puntos porcentuales, el ensayo se deberá repetir.
- El índice plástico se obtuvo de la diferencia entre límite líquido y límite plástico.

6.2.5. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.

Se determinó la humedad óptima que debe presentar el suelo para conseguir con el proceso de compactación a una energía específica ($2700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$) el peso unitario seco máximo bajo el siguiente procedimiento guiado por la norma INV E-142-13 relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación).

El ensayo se realizó mediante el método “A” teniendo en cuenta como parámetro principal la distribución granulométrica del material:

- Se pesó y registró la masa del molde cilíndrico (sin placa base, ni collar)
- Se tamizó la muestra de suelo y mezclaron los porcentajes (mezcla 1, 2 y 3). Se determinó la humedad natural del material.
- Se preparó una muestra de suelo de aproximadamente 4.0 kg proporcionado la cantidad de agua a adicional para obtener una humedad de moldeo que se aproxime tentativamente a la humedad óptima (Ilustración 8-A). Es importante tener en cuenta que la muestra de suelo se preparó por vía húmeda y por lo tanto presentaba una humedad inicial determinada en el ítem 1.

- Se ensambló y aseguró la placa base y el collar de extensión al molde
- Se llenó y se distribuyó la mezcla de suelo en el molde, fraccionándola en 5 capas equitativas, a cada capa se le aplicaron 25 golpes por minuto con el martillo de compactación siguiendo el patrón de impacto (Ilustración 7)

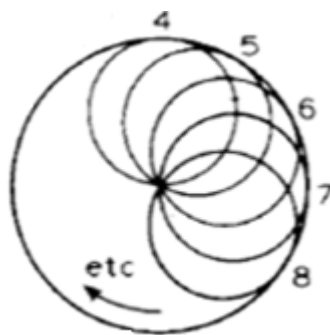


Ilustración 7. Patrón de impactos para la compactación de las capas de material (Método A) INVIAS. INV-142- 13. Fig. 142.

- Posterior a la compactación se removió el collar de extensión y se enrasó la superficie con un cuchillo para remover el exceso de material en la parte superior del molde. (Ilustración 8-B).
- Se desmotó la placa base y se determinó el peso del molde con la muestra compactada. Posteriormente se obtuvo una muestra de suelo con la cual se determinó la humedad del material.
- Se repitió el procedimiento con cuatro porcentajes de humedad diferentes para asegurar que existiesen datos a ambos lados del punto óptimo de humedad que permitieran la elaboración de la curva de compactación.



Ilustración 8. A) Adición del contenido de agua con un atomizador. B) Material enrasado a la altura del molde cilíndrico. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019)

Se calculó:

- Masa seca de la fracción de ensayo.
- Humedad de moldeo de cada muestra ensayada.
- Densidad húmeda de cada muestra.

$$\rho_h = \frac{M_t - M_{md}}{V}$$

Donde:

ρ_h : Densidad húmeda de la muestra compactada (gr/cm^3)

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde (gr)

M_{MD} : Masa del molde de compactación (gr)

V: Volumen del molde (cm^3)

1. Peso unitario seco de cada muestra.

$$\gamma_d = \frac{\rho_h}{1 + W/100}$$

Donde:

γ_d : Peso unitario seco de la muestra compactada (gr/cm³)

W: humedad de la fracción de suelo

6.3. Determinación de mezcla base y óptima

El objetivo de la mezcla base y óptima es determinar la resistencia máxima de cada dosificación a partir de la aplicación de carga axial no confinada. El procedimiento general consistió en realizar probetas compactadas en moldes cúbicos, curadas durante 21 días cubiertas del sol y el viento, posteriormente, se fallaron en la Máquina Universal obteniendo resultados respectivos de esfuerzo y deformación.

6.3.1. Componentes y su dosificación.

Teniendo en cuenta los referentes teóricos y prácticos evaluados, se realizó el proceso de selección del material, definiendo para las mezclas los siguientes componentes:

- ✓ Arena gruesa: Tamiz N° 4 al N° 40
- ✓ Arena media – fina: Tamiz N° 40 al N° 200
- ✓ Arcilla Diatomea: Pasante tamiz 100
- ✓ Concreto reciclado: Tamiz N° 40 al N° 200

✓ Agua: La cantidad necesaria para que cada muestra alcance la humedad óptima.

Se combinaron los materiales (Ilustración 9) y se dejaron en reposo durante dos días para homogenizar la humedad contenida en ellos. Cada una de las mezclas obtenidas se especifican en la Tabla 1 y 2



Ilustración 9. Mezcla 1, 2 y 3 posterior al mezclado con arcilla diatomea. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Tabla 1.

Distribución Porcentual de los Componentes Mezcla Base (M1, M2 y M3)

<u>Mezcla</u>	<u>Arena gruesa</u>	<u>Arena media fina</u>	<u>Arcilla</u>
M1	5 %	65 %	30 %
M2	0 %	75 %	25 %
M3	0 %	65 %	35 %

Nota: Autoría propia (2019)

A cada una de las mezclas base (M1, M2 y M3) se les realizó el ensayo modificado de compactación con el objeto de conocer la humedad óptima de moldeo para la fabricación de las probetas.

Tabla 2.

Distribución porcentual de los componentes mezcla óptima (M4, M5 y M6)

Mezcla	Mezcla base	Concreto reciclado
M4	50 %	50 %
M5	70 %	30 %
M6	90 %	10 %

Nota: Autoría propia (2019)

Las composiciones porcentuales de las mezclas óptimas (Tabla 2) se definieron a partir de la composición de mezcla base de mayor resistencia a compresión, ya que a esta composición se le adicionaron porcentajes de concreto reciclado en proporción peso - peso.

6.3.2. Fabricación de moldes.

Durante el proceso de fabricación de los moldes se realizaron tres tipos, los cuales se adaptaron de la siguiente manera:

El primer molde se pensó como un cubo con sus aristas soldadas, base y tapa sueltas (Ilustración 10), a fin de realizar por presión la extracción de la probeta después de la compresión del material. Este sistema no proporciono el resultado esperado ya que la extracción se dificultó a causa de que el material después de someterse a la compactación quedaba por su consistencia adherido a las paredes del molde impidiendo sacar la probeta sin provocar fracturas en ella.



Ilustración 10. Láminas en acero para molde N°1. Elaboración propia (2019).

El segundo molde se realizó con el sistema de bisagras y tornillo de ensamble (Ilustración 11), sin embargo, la especificación (espesor) de la lámina de acero fue inferior a lo requerido, provocando que las paredes del molde se deformasen durante el proceso de compactación, por lo cual, la distribución de la carga aplicada no se realizó uniformemente y al dar apertura parcial al molde se evidenciaron fisuras verticales en las probetas.



Ilustración 11. Espécimen fracturado por pandeo de láminas durante compactación en molde N°2. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Las medidas del segundo molde fueron de 10.5 x 10.5 x 10.5 cm lo que impidió colocar el suficiente volumen de material para que después de realizar la compactación la altura de los especímenes fuese de 10 cm. Las probetas realizadas con este molde presentaban una altura promedio de 7.5cm.

El tercer molde se realizó con sistema de apertura parcial por medio de bisagras y tornillo de ensamble, sin embargo, se mejoró la especificación del material utilizando lámina de acero SAE 1045 de 3/16” unida a tope con soldadura de arco eléctrico reforzada con doble cordón en las aristas (Ilustración 12). El molde conto con una placa adicional superior para evitar el pandeo del material en el punto de aplicación de carga durante su compactación.

Las dimensiones internas fueron de 10.6 x 10.6 x 15 cm, la cuales se seleccionaron teniendo en cuenta la norma peruana N.080 [1] de construcciones en tierra reforzada [1] donde se especifica que las dimensiones de los especímenes para el ensayo de compresión a carga axial deben ser de 10 x10 x 10 cm.



Ilustración 12. Molde N°3 recubierto internamente con pintura anticorrosiva.
Elaboración propia (2019)

6.3.3. Fabricación de probetas.

Los especímenes para el ensayo de compresión axial fueron resultado de un procedimiento experimental adaptado a las condiciones que se presentaron durante el proceso de fabricación de los mismos. A continuación, se describe el paso a paso realizado para la fabricación:

Para cada mezcla se combinaron los porcentajes correspondientes por componente (Tabla 1) teniendo en cuenta la densidad del material y el volumen requerido para realizar tres especímenes. Dado que el procedimiento fue experimental, se prepararon por mezcla 12.0 kg suficientes para realizar 5 probetas, con el fin que durante el proceso se pudiesen descartar probetas que presentar algún tipo de anomalías en su dimensión o durante el proceso de desencofrado.



Ilustración 13. Proceso de humedecimiento y mezclado para la fabricación de especímenes. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Posteriormente, se calculó el contenido de agua faltante para obtener una humedad de 13%, teniendo en cuenta que el material presenta una humedad residual determinada previamente. Este contenido se aplicó con atomizador durante el mezclado del material, asegurando así la homogenización del mismo (Ilustración 13). El procedimiento se realizó sobre plástico a fin de evitar al máximo la pérdida de humedad.

Se preparó el molde para el llenado de la siguiente manera:

- ✓ Se realizó apertura parcial y se limpió la superficie interna para evitar material adherido.
- ✓ Se cerró el molde y ajusto con los tornillos correspondientes.

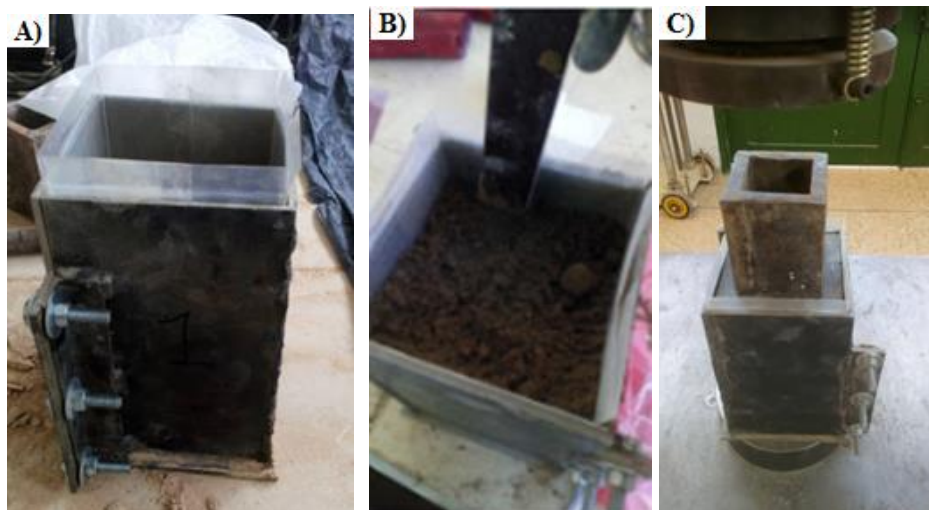


Ilustración 14. A) molde en acero y lámina de polipropileno. B) llenado del molde y compactado manual del material en 5 capas. C) preparación y centro de vástago para aplicación de carga. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Se realizó un molde adicional (10.5 x 10.5 x 20cm) en lámina de polipropileno transparente de 16 puntos y se posicionó en la parte interna del molde de acero (Ilustración 14-A). El requerimiento de esta lámina se dio por la necesidad de mejorar el desencofrado al evitar que el material cohesivo se quedara adherido a las paredes del molde (Ilustración 11).

El llenado del molde se realizó en cinco capas equitativas, en cada capa se realizó un apisonado leve con un elemento de mano para disminuir los vacíos internos del material suelto y nivelar el mismo (ilustración 14-B). La última capa lleno a tope el molde para asegurar que después de la compactación la diferencia de alturas no fuese menor que la dimensión especificada para el espécimen

✓Se posicionó la tapa en acero y se verificó que quedara a nivel para proporcionar una distribución de esfuerzos adecuada. Se colocó un elemento de extensión para llegar a la altura del vástago de la Máquina Universal (Ilustración 14-C).

✓Se compactaron las probetas haciendo uso de la Máquina Universal UH-500KNI. La compactación se realizó con una aplicación de carga máxima de 35 kN.

✓El desencofrado de las probetas se ejecutó retirando los tornillos del molde y dándole apertura al mismo, luego se extrajo suavemente la probeta recubierta con el molde de polipropileno para finalmente soltarlo cuidadosamente (Ilustración 15).

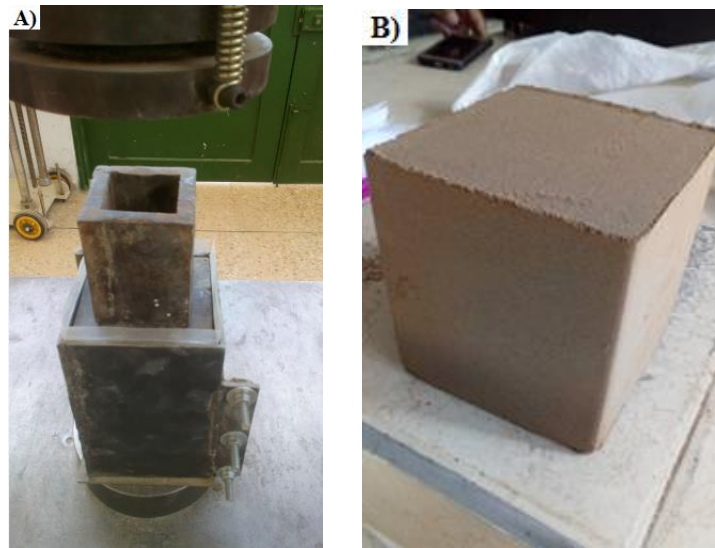


Ilustración 15. A) Aplicación de para compactación. B) Espécimen desencofrado. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

6.3.4. Proceso de curado.

Teniendo en cuenta investigaciones previas como la de Herreras E. [2], posterior al desencofrado de las probetas se dio inicio al proceso experimental de curado, en el que se forraron los cubos con papel vinipel y se situaron en cuarto oscuro durante 7 días (Ilustración 16-A). Luego de este tiempo se procedió a retirar el vinipel y posicionar las probetas en un lugar que permitiese el secado al aire libre evitando el contacto directo con los rayos del sol y el agua de lluvia durante 14 días adicionales (Ilustración 16-B).



Ilustración 16. A) Recubrimiento del espécimen desencofrado con vinipel para proceso de curado 7 días. B) Proceso de curado 14 días, especímenes al aire libre protegidos del sol y la lluvia. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

Una vez transcurridos los 21 días de curado, se procedió a la realización del ensayo de resistencia a compresión simple con cada una de las probetas.

7. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo del proceso metodológico.

7.1. Ensayos de caracterización

En estos ensayos se determinaron las características físicas del material evaluando la idoneidad del mismo como material de construcción basado en el estado del arte, cuya importancia radica en la planificación y toma de decisiones con respecto a las composiciones porcentuales de las mezclas ensayadas.

7.1.1. Ensayo de humedad natural.

La humedad inicial del suelo al ser extraído es de 4.43% (Tabla 3-A). La humedad inicial del concreto reciclado, posterior a la trituración en la máquina de mandíbulas y el proceso de tamizado es del 5.08% (Tabla 3-B).

Tabla 3.

Resultado del ensayo de humedad natural. A) Humedad natural a muestra de suelo. B) Humedad natural a muestra de concreto reciclado.

A) <u>Datos de entrada</u>		B) <u>Datos de entrada</u>	
W molde [g]	16.50	W molde [g]	15.50
W molde + mh [g]	144.74	W molde + mh [g]	40.30
W molde + ms [g]	139.30	W molde + ms [g]	39.10
A) <u>Cálculos</u>		B) <u>Cálculos</u>	
W mh [g]	128.24	W mh [g]	24.80
W ms [g]	122.80	W ms [g]	23.60
W agua [g]	5.44	W agua [g]	1.20
Humedad [%]	4.43%	Humedad [%]	5.08%

Nota: Autoría propia (2019)

Inmediatamente después de la determinación de la humedad inicial, estos materiales fueron secados en horno para trabajar con ellos por vía seca.

7.1.2. Ensayo de granulometría.

Se determinó la distribución de partículas del suelo (Tabla 4) sin ningún proceso o adición de material previo a fin de analizar esta propiedad para el diseño de las mezclas e identificar los ajustes correspondientes, considerando la información recolectada en el estado del arte.

Tabla 4.

Resultado del ensayo de granulometría de la muestra suelo.

<u>No Tamiz</u>	<u>Diámetro [mm]</u>	<u>Masa del suelo retenido [g]</u>	<u>Porcentaje retenido [%]</u>	<u>Porcentaje reten. Acum. [%]</u>	<u>Porcentaje que pasa [%]</u>
4	4.750	0.8	0.08	0.08	99.92%
8	2.360	147.3	14.73	14.81	85.19%
16	1.100	152.5	15.25	30.06	69.94%
30	0.600	191.3	19.13	49.19	50.81%
50	0.300	270.1	27.01	76.21	23.79%
100	0.150	167	16.70	92.91	7.09%
200	0.075	50.5	5.05	97.96	2.04%
Fondo		20.4	2.04	100.00	
Σ	OK	999.9			

Autoría propia (2019)

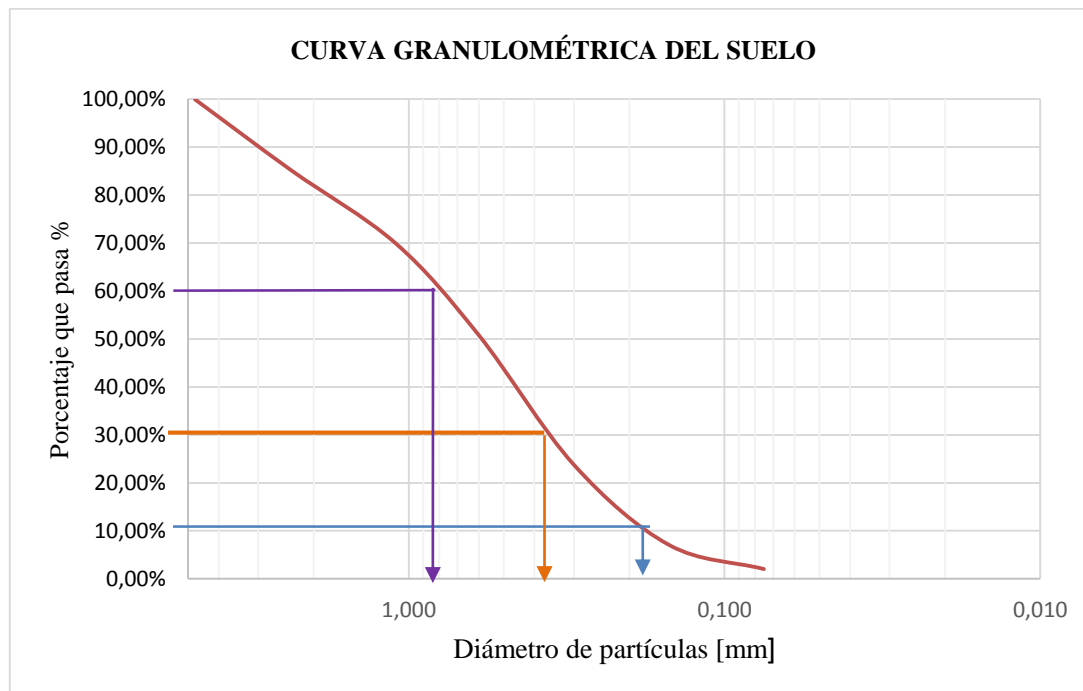
Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de uniformidad (Cu): Representa la forma de extensión que presenta la curva granulométrica (Gráfica 1).

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{0.80}{0.185} = 4.32$$

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60 * D10} = \frac{(0.37)^2}{0.80 * 0.185} = 0.925$$

El suelo se clasificó como arena mal gradada “SW” según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Teniendo en cuenta lo anterior y considerando que la mezcla debe contar con algún tipo de componente que proporcione adhesión a la muestra, se requirió un mejoramiento del suelo para poder ser analizado como material

para la construcción. Este mejoramiento se analizó por medio del software CES-EDUPACK cuya información se amplía más adelante.



Gráfica 1. Curva de distribución de partículas o curva granulométrica de la muestra de suelo. Autoría propia (2019).

Los cilindros de concreto reciclado se fracturaron por medio de la trituradora de mandíbula del laboratorio de Metalurgia de la Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia (Ilustración 3-A) hasta llegar a un tamaño de partícula pasante tamiz N 4. En la tabla 5 se muestra el resultado de la distribución de partículas

Tabla 5.

Resultado del ensayo de granulometría de la muestra de concreto reciclado.

<u>No Tamiz</u>	<u>Diámetro [mm]</u>	<u>Masa del suelo retenido [g]</u>	<u>Porcentaje retenido [%]</u>	<u>Porcentaje reten. Acum. [%]</u>	<u>Porcentaje que pasa [%]</u>
4	4.750	2.8	0.28%	0.28%	99.72%
8	2.360	238	23.85%	24.13%	75.87%
16	1.100	168.8	16.91%	41.04%	58.96%
30	0.600	177.8	17.82%	58.86%	41.14%
50	0.300	332.1	33.28%	92.13%	7.87%
100	0.150	76.1	7.63%	99.76%	0.24%
200	0.075	0.9	0.09%	99.85%	0.15%
Fondo		1.5	0.15%	100.00%	
Σ	OK	998.0			

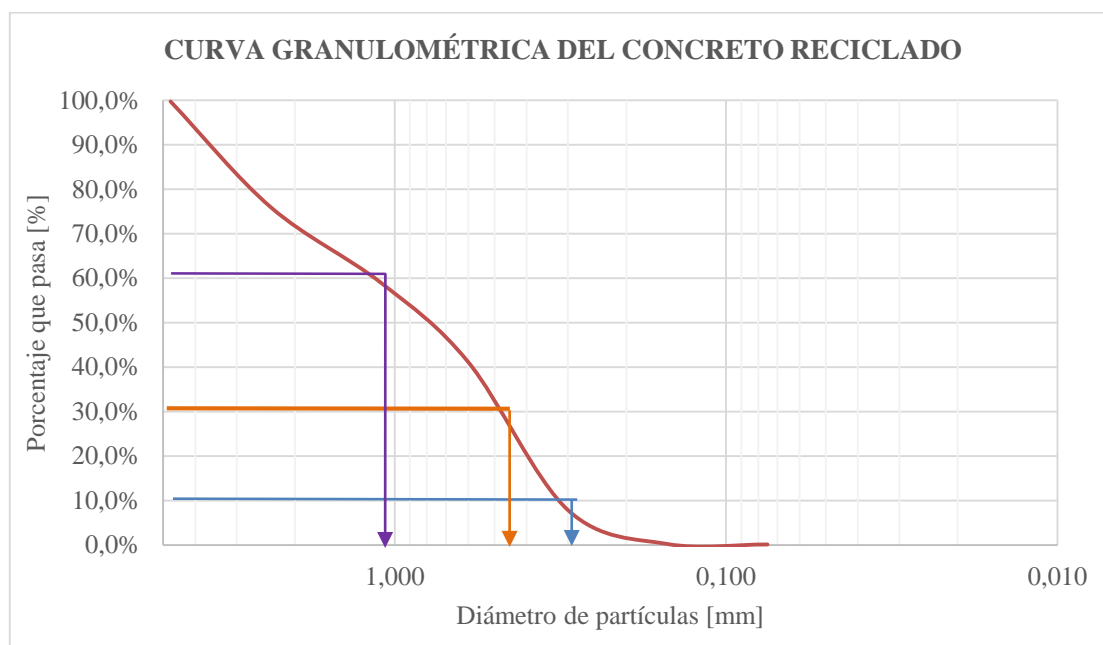
Nota: Autoría propia (2019)

Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de uniformidad (Cu): Representa la forma de extensión que presenta la curva granulométrica (gráfica 2).

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{1.20}{0.31} = 3.87$$

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60 * D10} = \frac{(0.48)^2}{1.20 * 0.31} = 0.62$$

El tamaño de las partículas del concreto reciclado después del primer proceso de trituración se clasificó como arena mal gradada “SW”. Se hace la aclaración de que el material no tiene las mismas propiedades de una arena, sin embargo, se clasifica como esta solo para identificar su tamaño de partícula.



Gráfica 2. Curva de distribución de partículas o curva granulométrica de la muestra de concreto reciclado. Autoría propia (2019).

Al obtener este resultado de distribución se definió que la inclusión de este componente a la mezcla óptima debía hacerse en partículas de mayor finura con el objetivo de ocupar los espacios generados por una mezcla cuyo porcentaje de arena es mayor. Se repitió el proceso de trituración hasta obtener un tamaño de partícula pasante tamiz 100.

7.1.3. Ensayo límites de consistencia.

Inicialmente se buscó determinar el límite líquido del suelo como materia prima. Durante el proceso del ensayo se variaron los contenidos de humedad presentando las condiciones; (1) la pasta de suelo se deslizaba continuamente por la superficie de cazuela, (2) el número del golpe para cerrar la ranura siempre eran menor a 25. Por lo

anterior, se definió que el suelo es un material no plástico y que no es posible determinar su límite líquido, lo que da sustento a la clasificación dada por granulometría, ya que las arenas son materiales no cohesivos.

Posteriormente, se realizó el ensayo de límite líquido y plástico a la mezcla base (M2) la cual contenía la siguiente distribución granulométrica: arena gruesa 0%; arena media – fina 75 % y arcilla 25%.

Tabla 6.
Resultados de límites de consistencia del suelo.

A) <u>ENSAYO LÍMITE LÍQUIDO</u>				B) <u>ENSAYO LÍMITE PLÁSTICO</u>		
Nº Molde	1.1	1.2	1.3	Nº Molde	1	2
Nº Golpes	34.00	25.00	24.00	----	----	----
W Molde [gr]	16.90	18.10	14.70	W Molde [gr]	7.00	6.90
W molde +mh [gr]	31.10	25.70	25.40	W molde +mh [gr]	12.90	12.70
W molde +ms [gr]	24.95	22.34	20.57	W molde +ms [gr]	11.02	10.99
W agua [gr]	5.80	3.26	4.61	W agua [gr]	1.71	1.61
W ms[gr]	8.05	4.24	5.87	W ms[gr]	4.02	4.09
Humedad [%]	72.0	76.9	78.4	Humedad [%]	42.3	39.4

Nota: Autoría propia (2019)

Los límites de consistencia se relacionan con la sujeción con que se unen los componentes de un material (como adhesividad y plasticidad) o la resistencia de los suelos a la deformación y la ruptura. Los resultados de este ensayo (Tabla 6) para la mezcla base (M2) son: límite líquido 79%; límite plástico 44% e índice plástico 35%, que pueden ser interpretados como un material predominantemente arenoso con buen porcentaje de arcilla de alta plasticidad.

7.1.4. Ensayo densidad unitaria máxima – Proctor modificado.

Para este ensayo se implementaron las mezclas M1 y M2 en las cuales se combinaron la arcilla diatomea con el suelo según los porcentajes descritos previamente (tabla 1). La finalidad del ensayo fue determinar la humedad óptima a la cual la mezcla alcance su densidad máxima después del proceso de compactación. De esta manera conociendo la humedad residual del material, se determinó fácilmente la cantidad de agua requerida en el diseño de mezcla y la energía homologa a utilizar con otro sistema.

Tabla 7.

Resultados del ensayo modificado de compactación para mezcla 1.

Mezcla #1 p/p Arena gruesa 5%, Arena media-fina 65%, Arcilla 30%					
Punto	1	2	3	4	5
% Humedad	5	8	12	15	18
W muestra (g)	12000	3500	3000	3500	3500
Agua (ml)	600	100	360	230	407
W molde + Mh C (gr)	5496	5630	5754	5784	5722
W cap (gr)	23.5	18.6	18.9	17	15.4
W cap +mhc (gr)	62.7	64	45	55	50.6
W cap + msc (gr)	60.8	60.5	42.2	50.2	44.8
Humedad real (%)	5.1	8.4	12.0	14.5	19.7
Y húmedo (gr/cm ³)	1.75	1.89	2.02	2.06	1.99
Y seco (gr/cm ³)	1.66	1.75	1.81	1.80	1.66

Nota: Autoría propia (2019)

En la tabla 7 se puede observar que para la distribución porcentual de la mezcla 1, el contenido de agua requerido para lograr la densidad máxima se basa en un rango de humedad del 12 al 14% proporcionando una densidad alrededor de 1.81 gr/cm³

En la tabla 8 se puede observar que para la distribución porcentual de la mezcla 2 la humedad real que proporciona la máxima densidad es 15.7% con una densidad alrededor de 1.82 gr/cm³.

Tabla 8.

Resultados del ensayo modificado de compactación para mezcla 2.

Mezcla #2 p/p Arena gruesa 0%, Arena media-fina 75%, Arcilla 25%					
Punto	1	2	3	4	5
% Humedad	5	8	12	15	18
W muestra (g)	3000	3000	3500	3500	3500
Agua (ml)	150	240	420	525	630
W molde + MhC (gr)	5604	5664	5832	5808	5709
W cap (gr)	18.3	17.9	18.6	17.1	17.2
W cap + mhc (gr)	95.5	82.8	47.4	60.3	69.1
W cap + msc (gr)	90.3	76.9	43.5	53.9	59.8
Humedad real (%)	7.2	10.0	15.7	17.4	21.8
Y húmedo (gr/cm ³)	1.86	1.93	2.11	2.08	1.98
Y seco (gr/cm ³)	1.74	1.75	1.82	1.77	1.62

Nota: Autoría propia (2019)

Luego de realizar los ensayos de compactación (tabla 7 y 8) se determinó que el comportamiento de cada una fue similar, consecuentemente la humedad de moldeo óptima se definió en un rango del 12% al 15% logrando un peso unitario seco máximo alrededor de 1.81 gr/cm³.

7.2. Selección material de mejoramiento








El software CES-EduPack es un programa que contiene una base de datos cercana a los 25.000 tipos de

materiales. En esta investigación se hizo uso de la librería denominada materiales de

arquitectura, implementando como método principal para la selección del material, el análisis de los parámetros a evaluar por medio de gráficas comparativas.

Entre la información de materiales que contiene el software se encuentran los siguientes subconjuntos:

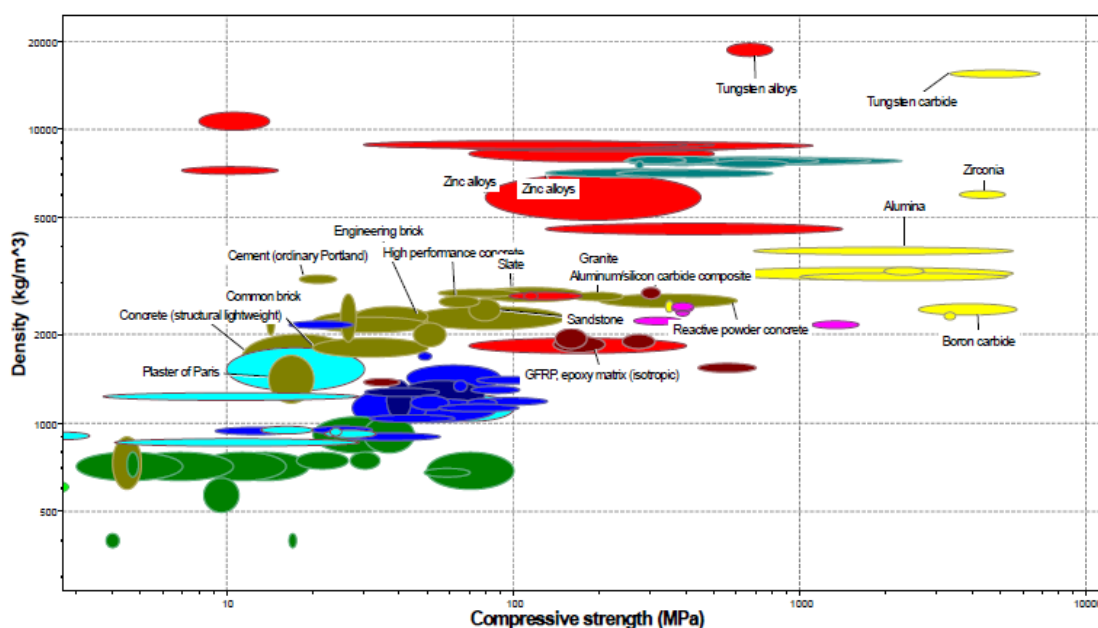
-  Amarillo: Cerámicas técnicas o cerámicas de uso tecnológico.
-  Verde claro: Fibras orgánicas.
-  Verde oscuro: Cementos, concretos, ladrillos, granito.
-  Rojo: Aleaciones.
-  Rojo oscuro: Materiales de matrices poliméricas.

En la gráfica 3 (Anexo 1) se relacionan los parámetros de densidad contra esfuerzo a compresión, en otras palabras, el peso por unidad de volumen contra la capacidad de resistir solicitaciones de compresión en sentido axial. En concordancia con el objetivo de la investigación, esta gráfica es la de mayor correlación ya que contiene propiedades a ser ensayadas en laboratorio como la densidad y el esfuerzo a compresión.

Como se observa en la gráfica, los materiales de uso cotidiano en la construcción como el concreto reforzado y el ladrillo estructural encuentran en un rango de densidad entre 2100 y 2400 kg/m³ y un esfuerzo a compresión entre 45 y 150 MPa. Los materiales de mayor esfuerzo a compresión son los cerámico de uso tecnológico como el silicio o la alúmina cuyo rango esta entre 3800 y 4000 kg/m³ para esfuerzos de compresión entre 690 y 5500 MPa. Estos materiales se mantienen en un rango de densidad similar a los de construcción.

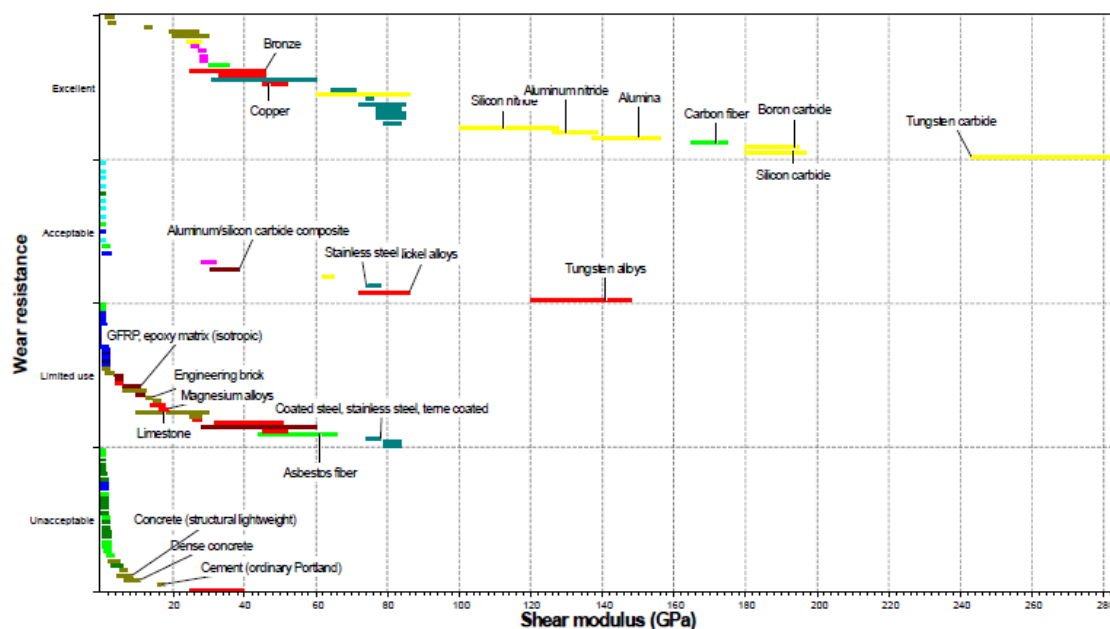
Es importante considerar que la densidad y el esfuerzo de compresión están muy relacionados en el análisis del comportamiento estructural, según la tipología de sistema

que se quiera desarrollar, por ejemplo, los materiales muy densos tienen complicaciones a partir del primer nivel de estructura ya que se considera su masa como aporte de carga muerta a la misma. Sin embargo, en viviendas de un solo nivel una alta densidad podría mejorar la estabilidad y el comportamiento ante sollicitaciones externas. Para fines de esta investigación se considerará una mayor densidad como una ventaja, por lo general las viviendas en tierra son de uno o dos niveles.



Gráfica 3. Relación de materiales densidad (kg/m^3) vs esfuerzo a compresión (MPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.

En la gráfica 4 (Anexo 2) se relacionan los parámetros de resistencia del material al contacto con el agua contra el módulo de cortante. Es importante recordar la resistencia al corte como la capacidad para soportar cargas de cizalladura y conservar su estabilidad. El módulo de cortante es como se relaciona este concepto por medio de una constante lineal cuando se aplica este tipo de esfuerzos al material.



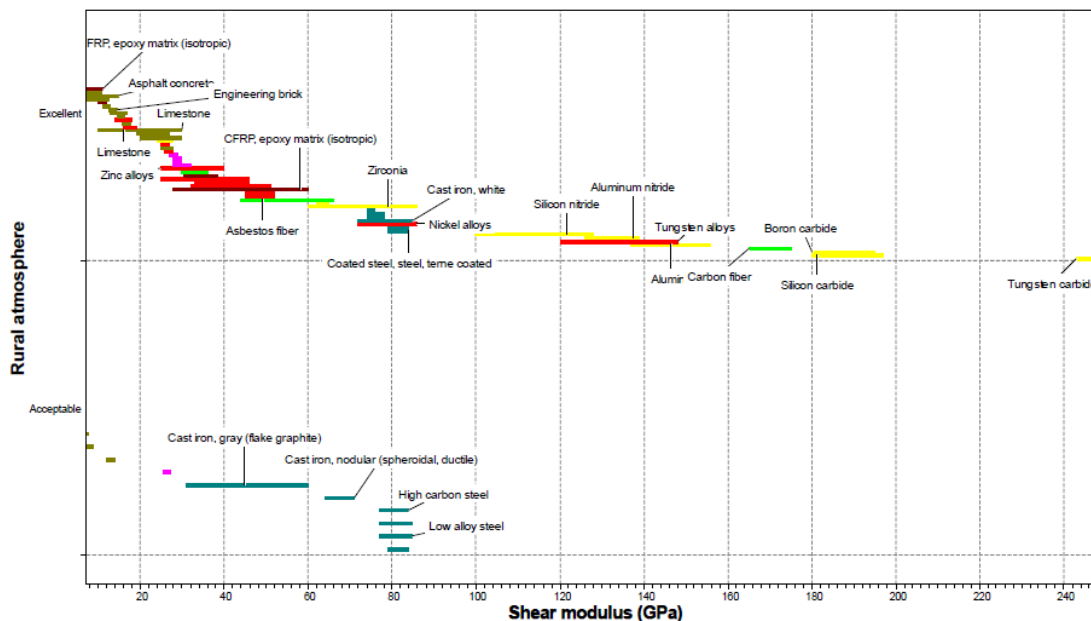
Gráfica 4. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al agua (kg/m^3) vs módulo de cortante (GPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.

Se seleccionaron estos parámetros de evaluación para adquirir información acerca de uno de los principales problemas que presentan las construcciones en tierra: la susceptibilidad ante condiciones ambientales en zonas húmedas o de alta precipitación y su baja capacidad de soporte ante esfuerzo de cizalladura.

En esta gráfica se observa que los materiales que presentan mayor resistencia al agua son las cerámicas y las aleaciones, siendo las primeras las que presentan mayor resistencia al corte. Se evidencia que los materiales de uso común en la construcción como el concreto, cemento, ladrillo estructural incluso las fibras son de uso limitado bajo estas condiciones.

En la gráfica 5 (Anexo 3) se relacionan los parámetros de resistencia al ambiente rural contra módulo de cortante. Estos parámetros se analizan porque las construcciones

en tierra se desarrollan generalmente bajo un ambiente rural expuesto al medio ambiente y condiciones de no uniformidad geográfica.



Gráfica 5. Relación de materiales módulo arquitectura. Resistencia al ambiente rural (kg/m^3) vs módulo de cortante (GPa). Software CES EduPack (2017). Granta Desing.

Existen componentes del ambiente que atacan directamente a los materiales, uno de estos es la humedad relativa del ambiente, la cual resulta crítica cuando se encuentra entre un 60 a 70%. La afectación se potencia cuando existe presencia de polvo e impurezas como el ácido sulfúrico producto de la combustión, las combinaciones orgánicas como el contenido de azufre en cocinas o amoniaco producido en establos, panaderas, urinarios. También se producen condiciones desfavorables cuando la temperatura se sitúa por debajo de la del rocío, condesando el vapor del agua y haciendo que este actúe ininterrumpidamente sobre el material.

A nivel general, todos los materiales que se enlistan tienen excelente resistencia a este tipo de agentes presentes en el medio ambiente, sin embargo, se vuelve a denotar que los cerámicos, las fibras orgánicas y las aleaciones superan el módulo de elasticidad de los demás elementos.

De las gráficas comparativas (Gráficas 5, 6 y 7) se seleccionaron los siguientes materiales, los cuales se considera que aportan propiedades significativas al requerimiento para mejorar el suelo como materia prima:

- Alúmina (Alumina)
- Arenisca (Sandstone)
- Caliza (Limestone)
- Carburo de Tungsteno (Tungsteno carbide)
- Cemento Portland (Ordinary portland)
- Concreto (Concrete)
- Fibra artificial de carbono (Carbon fibers)
- Fibra natural de asbesto (Asbesto fiber)
- Ladrillo estructural (Engineering brick)
- Polímeros (GFRP – epoxy matrix isotropic)
- Silicio (Silicon)
- Nitruro de silicio (Silicon Nitride)

El material seleccionado es una arcilla diatomea explotada en el municipio de Tutaboyacá por la planta de fertilizantes y diatomeas S.A.S. Sus características distintivas son: material blando, bajo peso específico, untuoso al tacto, homogéneo y muy fino. Este material fue caracterizado químicamente por el grupo interdisciplinario de estudios

moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia por medio de ensayo de espectrómetro de fluorescencia de rayos X en donde se reporta un contenido de **16.42 en porcentaje peso/peso de alúmina (Al₂O₃)**.

Tabla 9.

Resultados del ensayo de espectrómetro de fluorescencia de rayos X de Diatomácea pulverizada.

OXIDO	SiO ₂	Al₂O₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	SO ₃	MnO
%p/p	59.43	16.42	5.46	5.23	1.75	0.56	0.49	0.41	0.24	0.109
Oxido	V ₂ O ₅	CuO	PbO	BaO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	ZnO	SrO	SnO ₂	NiO
%p/p	0.057	0.049	0.025	0.023	0.018	0.015	0.013	0.012	0.011	0.08

Nota: Grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia. Planta de fertilizantes y diatomeas S.A.S (2018).

La selección de este material se realizó teniendo en cuenta: compatibilidad con el suelo, bajo costo, fácil acceso y mínimo impacto ambiental, ya que se buscó continuar el enfoque de construcción autosostenible.

7.3. Compactación y curado de los especímenes mezcla base (M1, M2 y M3) y mezcla óptima (M4, M5 y M6).

Para efectos de esta investigación la mezcla base está dada por ser la combinación entre el suelo y la arcilla diatomea (material de mejoramiento) de la cual resultan tres tipos de mezcla (M1, M2 Y M3) con diferente composición porcentual (Tabla 1). La mezcla óptima se definió como la mezcla base de mayor resistencia a compresión adicionada con concreto reciclado. Se realizaron tres tipos de mezcla adicionada (M4, M5 Y M6) en las cuales se varió la composición porcentual. (Tabla 2).

Inmediatamente después de la compactación y durante los 21 días del proceso de curado de los especímenes, se realizó un control de peso y humedades para las mezclas

obteniendo así información del comportamiento en cada etapa. Se tomaron los siguientes datos:

- Nombre de la probeta N° de mezcla – N° de probeta
- Peso de la probeta día 0 posterior a la compactación (gr)
- Humedad de la probeta día 0 posterior a la compactación (%)
- Peso de la probeta día 7 posterior a la compactación (gr)
- Humedad de la probeta día 7 posterior a la compactación (%)
- Peso de la probeta día 21 posterior a la compactación (gr)
- Humedad de la probeta día 21 posterior a la compactación (%)

A continuación, se presenta la información recolectada en las tablas 10 y 11.

Tabla 10.

Datos de la variación de peso y humedad en especímenes de mezcla 1, 2 y 3 durante el proceso de curado (21 días)

Datos Iniciales			0 días			7 días (curado húmedo)			21 días (14 días secado)		
<u>Mezcla</u>	<u>Carga aplic. (kN)</u>	<u>Probeta</u>	<u>W cub. [gr]</u>	<u>peso [%]</u>	<u>Humed. d. [%]</u>	<u>W cub [gr]</u>	<u>peso [%]</u>	<u>Humed. [%]</u>	<u>W cub [gr]</u>	<u>peso [%]</u>	<u>Humed. [%]</u>
#1	38	M1-P4	2845.1	100	11.11	2852	100.24	11.35	2596.9	91.28	1.55
		M1-P7	2857.3	100	13.49	2862	100.16	13.65	2597.7	90.91	3.49
		M1-P8	2788.4	100	12.93	2796	100.27	13.20	2541.9	91.16	3.23
#2	35	M2-P9	2752	100	12.90	2748	99.85	12.76	2451	89.06	0.62
		M2-P10	2720	100	12.90	2718	99.93	12.83	2420	88.97	0.51
		M2-P12	1560	100	12.90	1556	99.74	12.65	1389	89.04	0.59
#3	35	M3-P14	2535	100	11.89	2534	99.96	11.85	2310	91.12	2.15
		M3-P15	2552	100	11.89	2552	100.00	11.89	2320.8	90.94	1.92
		M3-P16	2402	100	11.89	2402	100.00	11.89	2184.4	90.94	1.92

Nota: Autoría propia (2019)

En la tabla 10 se observa que durante los primeros 7 días de curado en cuarto oscuro posterior a la desenvoltura de los especímenes, estos no perdieron humedad significativa

además de no presentaron retracción o fisuración excesiva. Durante los siguientes 14 días de curado al aire libre sin exposición al sol o la lluvia, la pérdida promedio de humedad fue del 85%.

Tabla 11.

Datos de la variación de peso y humedad en especímenes de mezcla óptima M4, M5 y M6 durante el proceso de curado (21 días)

DATOS INICIALES			0 días			7 días (curado húmedo)			21 días (14 días secado)		
Mezc.	Carga aplic. (kN)	Probeta	W cub. [gr]	peso [%]	Humed. [%]	W cub [gr]	peso [%]	Humed. [%]	W cub [gr]	peso [%]	Humed. [%]
#4	35	M4-P24	2725.5	100	10.37	2718	99.72	10.07	2539.4	93.17	3.04
		M4-P25	2518.1	100	10.37	2505.2	99.49	9.82	2364.5	93.90	3.87
		M4-P27	2665.2	100	10.37	2650.6	99.45	9.78	2462.3	92.39	2.13
#5	35	M5-P21	2739.3	100	9.97	2729.1	99.63	9.57	2543.1	92.84	2.26
		M5-P22	2850.5	100	9.97	2842.4	99.72	9.67	2660.1	93.32	2.81
		M5-P23	2663.9	100	9.97	2654.8	99.66	9.61	2501.6	93.91	3.48
#6	35	M6-P17	2805.4	100	11.73	2800.8	99.84	11.55	2584.9	92.14	3.20
		M6-P18	2790.1	100	11.98	2783.6	99.77	11.73	2565.4	91.95	3.22
		M6-P19	2728.7	100	11.81	2721.8	99.75	11.54	2511.9	92.05	3.18

Autoría propia (2019)

En la tabla 11 se observa que durante los primeros 7 días de curado en cuarto oscuro las mezclas M4 y M5 a diferencia de la mezcla M1, M2 y M3 (tabla 10) presentaron mayor disminución de la humedad con un promedio de 3.4%. Las tres probetas de la mezcla M6 mantiene el comportamiento inicial con una baja pérdida de humedad. Ninguna probeta presento retracción o fisuración excesiva. Durante los siguientes 14 días de curado al aire libre sin exposición al sol o la lluvia, se evidencio una pérdida promedio de humedad del 72%.

7.4. Ensayo de compresión uniaxial no confinado.

El objetivo de realizar este tipo de ensayo fue visualizar el comportamiento del material ante la aplicación de carga axial y obtener información sobre la carga máxima

que soporta la probeta sin llegar a una deformación indeseable. Este ensayo se realizó en la Máquina Universal UH-500KNI

Previo a realizar el ensayo se alinearon las caras de las probetas con el fin de rectificar la nivelación de las mismas y se tomaron sus respectivas dimensiones y pesos. Posteriormente se posicionaron y centraron cada una de las probetas en la base de la Máquina Universal, y se ajustó el vástago a la altura de las mismas. El centrado y la nivelación son pasos fundamentales para evitar desviaciones de la carga aplicada, pues estas podrían proporcionar resultados erróneos.

Mediante el uso del software Trapezium se configuró la Máquina Universal con los siguientes parámetros definidos para el ensayo de compresión uniaxial:

- ✓ Tipo y nombre del ensayo.
- ✓ Nombre de la probeta a fallar.
- ✓ Dimensiones de la probeta: Ancho, espesor y alto (mm).
- ✓ Velocidad del ensayo.

El tipo de falla predominante en esta investigación se asemeja a “brittle break”

(Ilustración 18) en donde la falla inicia en las paredes del espécimen prolongándose hasta el punto de mayor sollicitación en el centro de la probeta

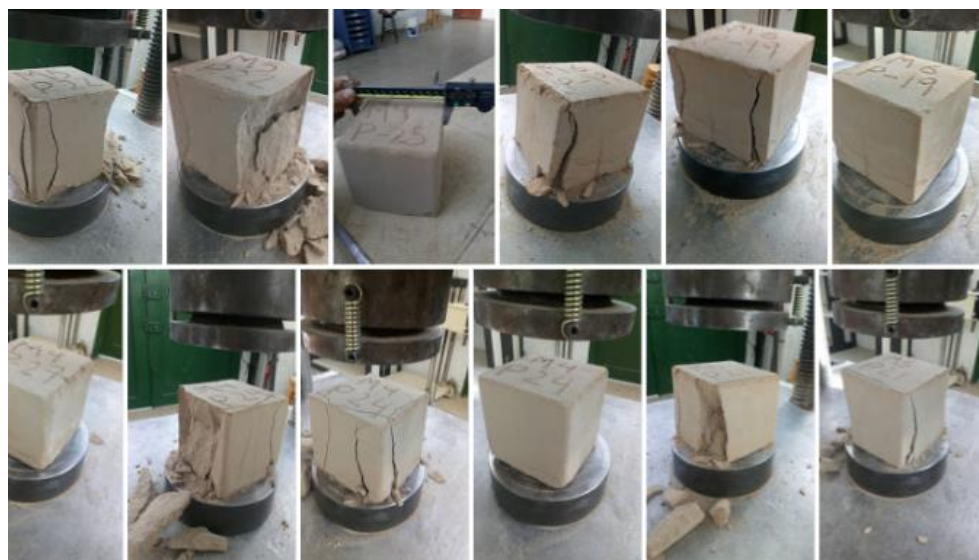


Ilustración 17. Especímenes posteriores a la falla del ensayo a compresión axial. Laboratorios de materiales y estructuras Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2019).

7.4.1. Ensayo de resistencia mecánica a la compresión simple en especímenes de mezcla 1, 2 y 3.

La determinación de la mezcla base se realizó a través del análisis de los resultados de las mezclas desarrolladas únicamente a partir del suelo. Esto con el fin de seleccionar las mejores características para evaluar el material de adición (concreto reciclado).

Tabla 12.

Resultados ensayo a compresión axial mezcla 1

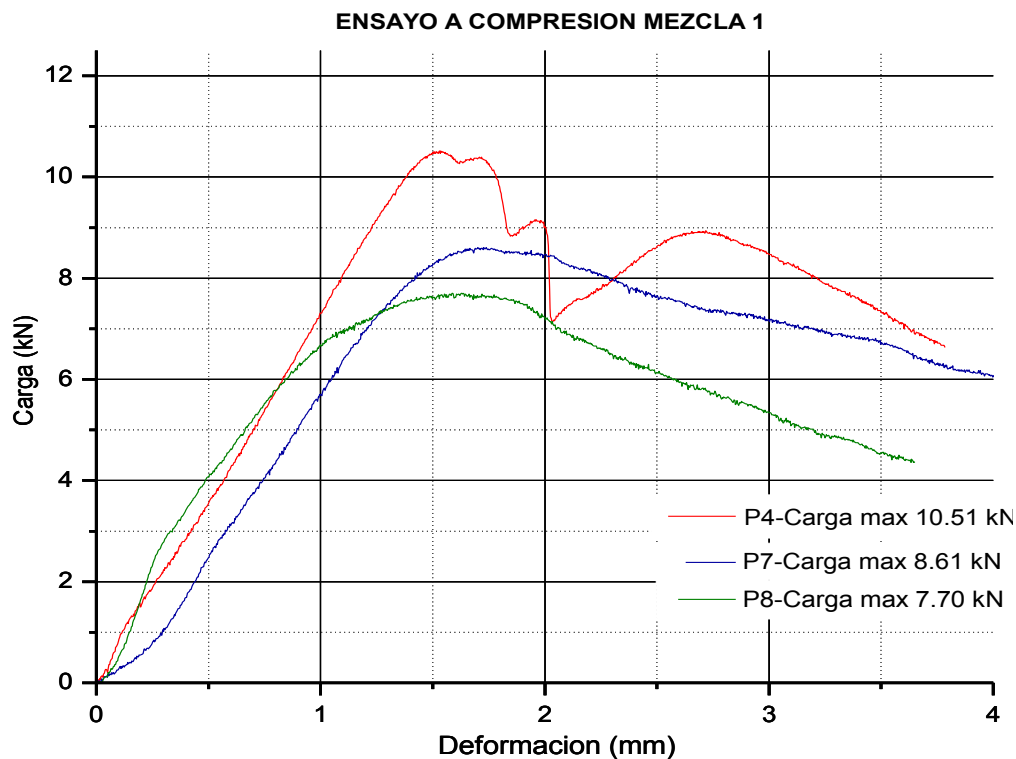
<u>Cubo</u>	<u>Peso (gr)</u>	<u>Área (mm²)</u>	<u>Carga (kN)</u>	<u>Esfuerzo (MPa)</u>	<u>Densidad (kg/m³)</u>
M1-P4	2596.9	13687.3	10.516	0.784	1.63
M1-P7	2597.7	13688.9	8.609	0.634	1.63
M1-P8	2541.9	13536.9	7.703	0.574	1.62

Nota: Autoría propia (2019)

La densidad es similar para probetas P4, P7 y P8, sin embargo, es inferior a la densidad máxima del ensayo Proctor modificado (Tabla 7 y 8) en un 12 %. Esta densidad se obtendría con un porcentaje de humedad óptima del 18%, sin embargo, se

descarta la posibilidad de un exceso de agua en la mezcla, pues en la tabla 10 se evidencia que la humedad de compactación se encontraba entre 11% y 13%, se infiere por lo tanto que el proceso de compactación no fue el adecuado.

Se observa que la probeta P4 es la que obtiene el mayor esfuerzo a compresión con 0.78 MPa resistiendo una carga máxima de 10.5 kN y coincide con ser la probeta que a la hora de falla presentaba la menor humedad de 1.55%. Las probetas P7 y P8 a la hora de la falla presentaron humedades superiores (Tabla 10)



Gráfica 6. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P1, P2 y P3 de mezcla 1 (arena gruesa 5%, arena media-fina 65%, arcilla 30%). Autoría propia (2019).

En la gráfica 6 se observa una zona inicial en donde se evidencia una tendencia lineal directamente proporcional entre la carga aplicada y la deformación producida en la probeta hasta llegar a una zona donde se incrementa la deformación a menor carga aplicada alcanzado el punto máximo de carga. En las probetas P7 y P8 se observa un comportamiento similar el cual después del punto de falla, el elemento no pierde su resistencia súbitamente, resistiendo menor carga a una mayor deformación. Sin embargo, en la probeta P4, el comportamiento es diferente, ya que después de la falla presenta una caída súbita de resistencia y posteriormente una recuperación de la misma en un segundo intento de resistencia similar al comportamiento de las otras probetas P4 Y P7.

Tabla 13.

Resultados ensayo a compresión axial mezcla 2

<u>Cubo</u>	<u>Peso (gr)</u>	<u>Área (mm²)</u>	<u>Carga (kN)</u>	<u>Esfuerzo (MPa)</u>	<u>Densidad (kg/m³)</u>
M2-P9	2451	13268.7	15.75	1.187	1.76
M2-P10	2420	12268.6	15.47	1.133	1.70
M2-P12	1389	12330.8	5.06	0.736	1.74

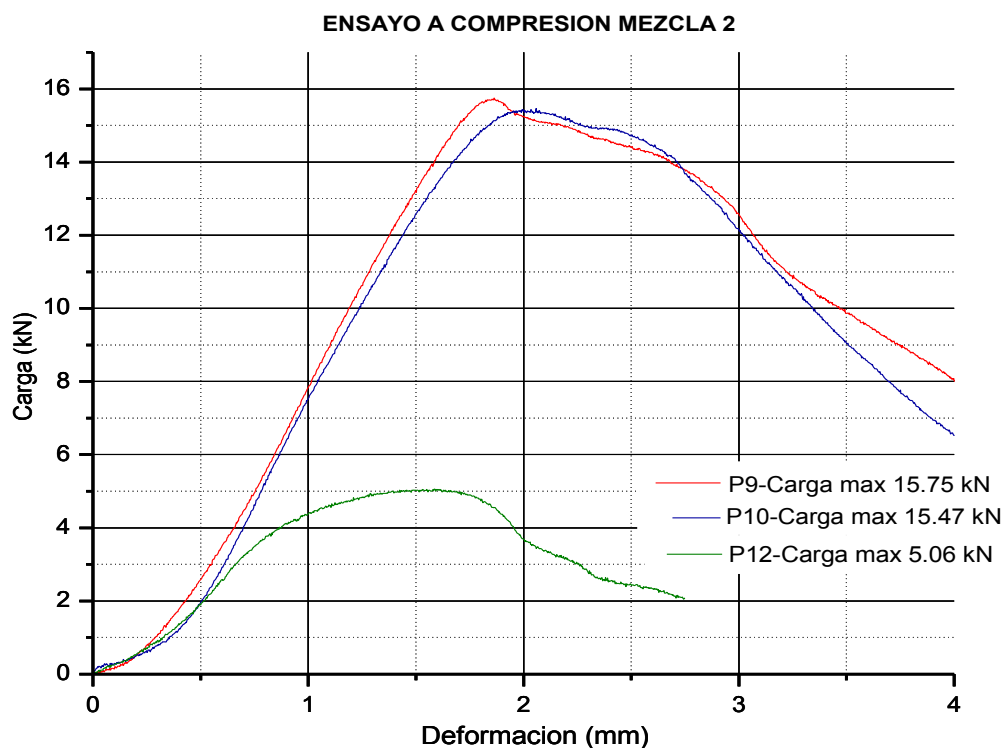
Nota: Autoría propia (2019)

La densidad es similar para probetas P9, P10 y P12, sin embargo, es inferior a la densidad máxima del ensayo Proctor modificado (Tabla 7 y 8) en un 7 %. Esta densidad se obtendría con un porcentaje de humedad óptima del 16%, se descarta la posibilidad de un exceso de agua en la mezcla pues en la tabla 10 se evidencia que la humedad de compactación fue cercana al 13%. A pesar que la probeta de mayor resistencia es la de mayor densidad no es una relación directamente proporcional en esta situación.

Se observa que la probeta P9 es la que obtiene el mayor esfuerzo a compresión con 1.18 MPa, resistiendo una carga máxima de 15.75 kN. De igual manera el esfuerzo de la

probeta P10 es de 1.13 MPa. Superando en ambos casos el esfuerzo mínimo requerido por la norma NTE.080 [1] de 1.0 MPa para este tipo de construcciones.

Las tres probetas de mezcla dos presentaron una humedad de falla de 0.60% aproximadamente (Tabla 10) siendo la menor humedad residual de todas las probetas de la investigación.



Gráfica 7. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P4, P5 y P6 de mezcla 2 (arena gruesa 0%, arena media-fina 75%, arcilla 25%). Autoría propia (2019).

En la gráfica 7, las probetas P9 y P10 presentaron un comportamiento similar, inicialmente se observa una zona de acomodación de partículas hasta donde la pendiente incrementa siendo directamente proporcional alcanzando el punto de resistencia máxima, posteriormente se observa una relajación del material con pendiente suave y

luego una mayor deformación. Después del punto de mayor resistencia se considera que el material ha fallado, sin embargo, no se presenta caída súbita de la resistencia, lo que da un indicativo que el material puede tener buenas características en la disipación de energía.

Tabla 14.

Resultados ensayo a compresión axial mezcla 3

Cubo	Peso (gr)	Área (mm²)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	Densidad (kg/m³)
M3-P14	2310	13339.61	6.37	0.51	1.6
M3-P15	2320.8	12430.81	6.03	0.47	1.64
M3-P16	2184.4	13339.61	6.14	0.51	1.57

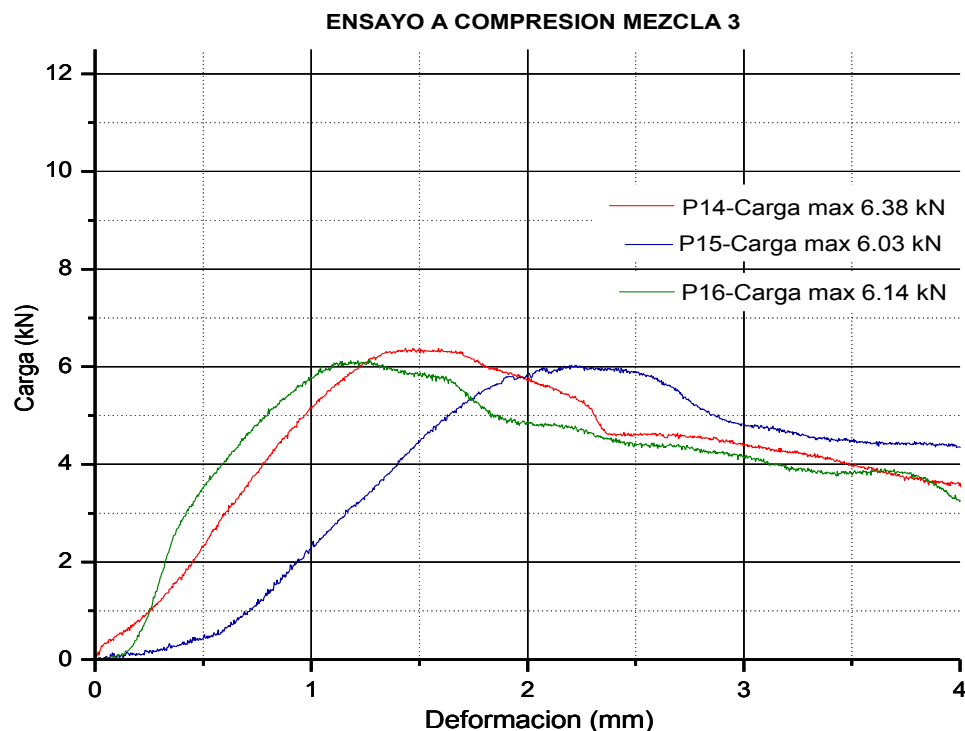
Nota: Autoría propia (2019)

La densidad es similar para probetas P14, P15 y P16, sin embargo, es inferior a la densidad máxima del ensayo proctor modificado (Tabla 7 y 8) en un 12% aproximadamente. Estas probetas se compactaron a una humedad del 12%.

Se observa que las probetas P14 y P16 son las que obtiene el mayor esfuerzo a compresión con 0.51 MPa y un promedio entre especímenes de 0.50 MPa. Las tres probetas de la mezcla presentaron una humedad aproximada de falla del 2.00% (Tabla 10). La resistencia a compresión de esta mezcla es 57% menor al resultado de la mezcla 2, por lo tanto, no cumple los parámetros mínimos de aceptación de las normas para la construcción en tierra [2]

En la gráfica 8, las probetas P14 y P15 presentaron un comportamiento similar en la zona elástica del material presentado la zona de acomodación de partículas y posteriormente una pendiente positiva entre la deformación y la carga, hasta alcanzar el punto de resistencia máxima, posteriormente se observa una relajación del material con

pendiente suave. El comportamiento de esta mezcla es similar a la de mezcla 2 luego de la falla, con una pérdida progresiva y no súbita de la resistencia del material.



Gráfica 8. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P14, P15 y P16 de mezcla 3 (arena gruesa 0%, arena media-fina 65%, arcilla 35%). Autoría propia (2019).

7.4.2. Ensayo de resistencia mecánica a la compresión simple en especímenes de mezcla 4, 5 y 6

La densidad es similar para probetas P24 y P25, sin embargo, es inferior a la densidad máxima del ensayo proctor modificado (Tabla 7 y 8) en un 14%. Se evidencia que la humedad de compactación fue del 10.37% lo cual está por debajo de la humedad óptima, siendo una de las razones por las que no alcanzó la densidad máxima. A pesar de esto no hay una relación directa proporcional entre el esfuerzo y la densidad máxima.

Tabla 15.

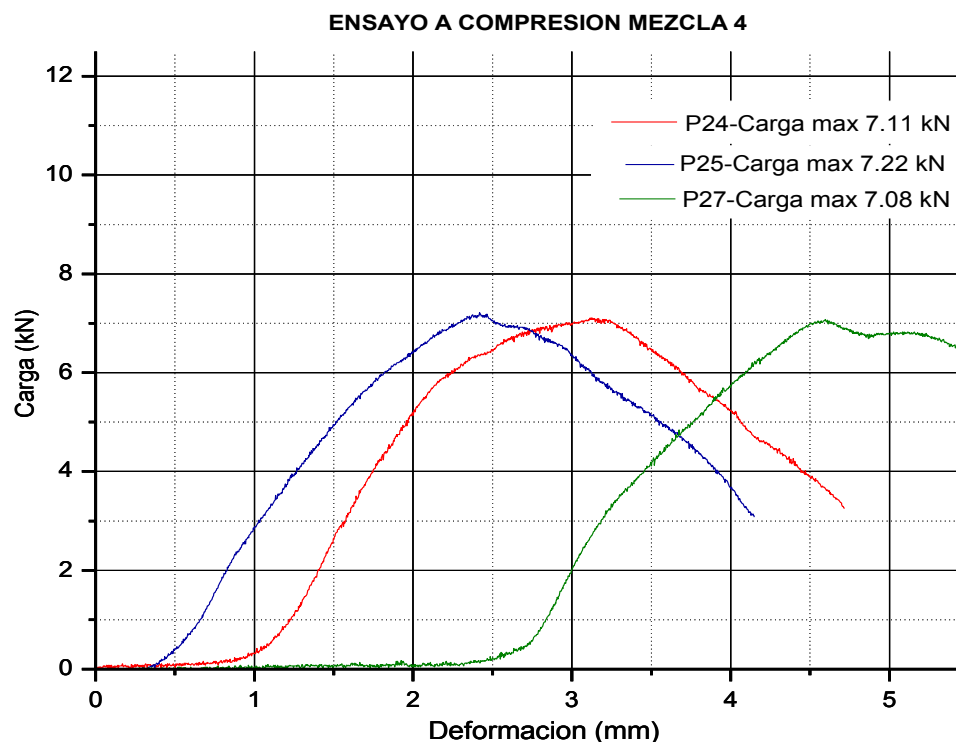
Resultados ensayo a compresión axial mezcla 4

<u>Cubo</u>	<u>Peso (gr)</u>	<u>Área (mm²)</u>	<u>Carga (kN)</u>	<u>Esfuerzo (MPa)</u>	<u>Densidad (kg/m³)</u>
M4-P24	2539.4	14175.31	7.11	0.53	1.55
M4-P25	2364.5	13144.44	7.22	0.53	1.55
M4-P27	2462.3	13274.31	7.08	0.53	1.61

Nota: Autoría propia (2019)

Las probetas P24, P25 y P27 obtuvieron un esfuerzo promedio de 0.53 MPa. La humedad de falla estuvo entre 2.15% y 3.87% (Tabla 11). La resistencia a compresión de esta mezcla es 53% menor al resultado de la mezcla 2, por lo tanto, no cumple los parámetros mínimos de aceptación de las normas para la construcción en tierra [2]

La mezcla 4 fue la que presentó un comportamiento más estable al observar el resultado de las probetas P24, P25 y P27 (gráfica 9), se observa que para los tres especímenes el ensayo a compresión inicia con una zona de acomodación de partículas, posteriormente se evidencia un incremento de la pendiente en la zona elástica hasta llegar al punto de mayor resistencia alrededor de los 7.10 kN, en donde inicia el decrecimiento de la resistencia a una mayor deformación con una pendiente similar a la observada en la zona elástica.



Gráfica 9. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P24, P25 y P27 de mezcla 4 (arena media-fina 37.5%, arcilla 12.5%, concreto 50%). Autoría propia (2019).

La densidad de las probetas de la mezcla 5 es similar para probetas P21, P22 y P23, sin embargo, es inferior a la densidad máxima del ensayo proctor modificado (Tabla 7 y 8) en un 11%. Se evidenció que la humedad de compactación fue de 9.97 %.

Tabla 16.

Resultados ensayo a compresión axial mezcla 5

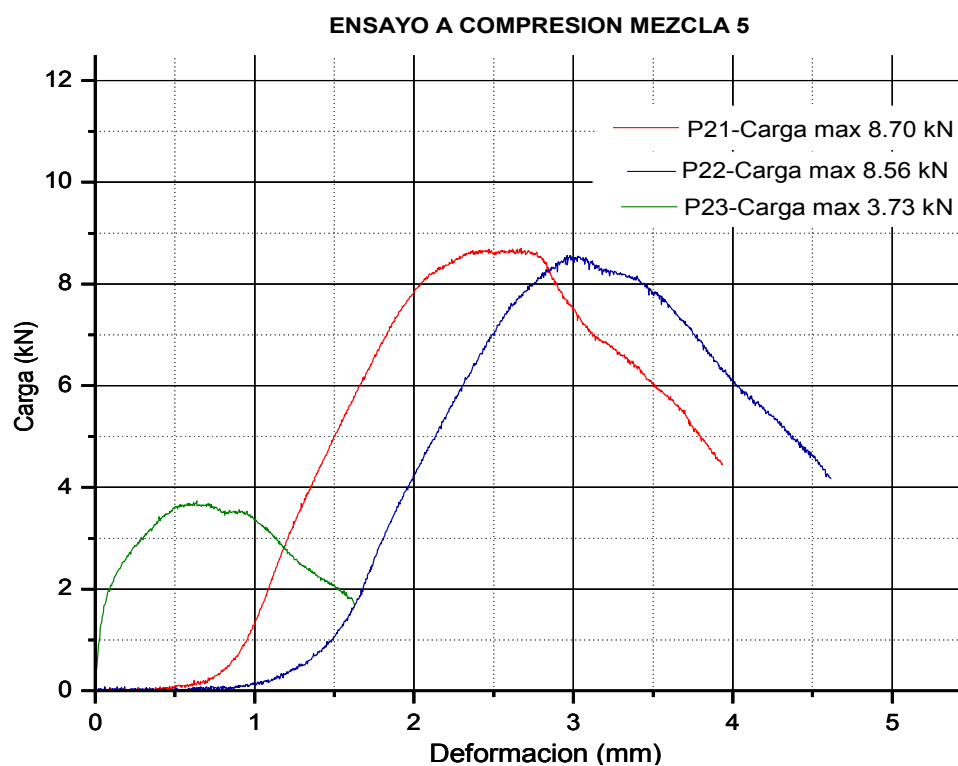
<u>Cubo</u>	<u>Peso (gr)</u>	<u>Área (mm²)</u>	<u>Carga (kN)</u>	<u>Esfuerzo (MPa)</u>	<u>Densidad (kg/m³)</u>
M5-P21	2543.1	13727.71	8.7	0.65	1.65
M5-P22	2660.1	14273.88	8.56	0.6	1.6
M5-P23	2501.6	13394.11	3.73	0.28	1.6

Nota: Autoría propia (2019)

La probeta P21 falló a un esfuerzo máximo de compresión de 0.65 MPa La humedad de falla estuvo entre 2.26% y 3.48% (Tabla 11). La resistencia a compresión de esta

mezcla es 43% menor al resultado de la mezcla 2, por lo tanto, no cumple los parámetros mínimos de aceptación de las normas para la construcción en tierra [2].

El comportamiento de las probetas P21 y P22 fue similar al de mezcla 2 en donde se observa la zona de acomodación, la zona elástica, el punto de falla y la pendiente decreciente de resistencia. Se desprecia la probeta P23 por estar tan alejada del rango de resistencia las probetas P21 y P22.



Gráfica 10. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P21, P22 y P23 de mezcla 5 (arena media-fina 52.5%, arcilla 17.5%, concreto 30%). Autoría propia (2019).

La mayor densidad la obtiene la probeta P17 con 1.72 kg/m^3 , sin embargo, la probeta P-19 aunque cuenta con una menor densidad obtuvo la mayor resistencia con una carga

de 11.69 kN y un esfuerzo a compresión con 0.87 MPa. La humedad de compactación se encontraba entre 12%.

Las tres probetas P17, P18 y P19 presentaron una humedad de falla superior al 3.00% aproximadamente (Tabla 11)

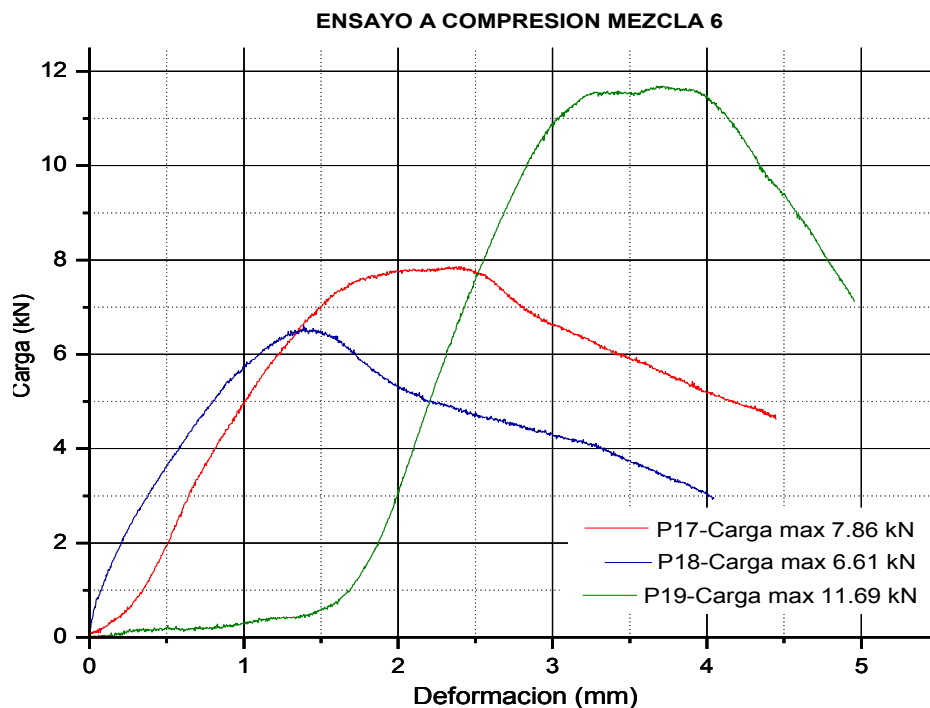
Tabla 17.

Resultados ensayo a compresión axial mezcla 6

Cubo	Peso (gr)	Área (mm²)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	Densidad (kg/m³)
M6-P17	2584.9	13263.33	7.86	0.6	1.72
M6-P18	2565.4	13506.21	6.61	0.5	1.67
M6-P19	2511.9	12974.72	11.69	0.87	1.68

Nota: Autoría propia (2019)

De las tres mezclas M4, M5 y M6 preparadas con concretos reciclado, la mezcla 6 es la que obtuvo mayor resistencia en la probeta P19 con 0.87 MPa, sin embargo, la resistencia promedio fue de 0.65 MPa, lo cual representa un 40% menos de la resistencia lograda en la Mezcla 2, por lo tanto, no cumple los parámetros mínimos de aceptación de las normas para la construcción en tierra [2]



Gráfica 11. Curva esfuerzo vs deformación de los especímenes P17, P18 y P19 de mezcla 6 (arena media-fina 67.5%, arcilla 22.5%, concreto 10%). Autoría propia (2019).

Cuando la carga aplicada superó el esfuerzo admisible del material, se observó fisuración y agrietamiento en las probetas (Ilustración 17). Se define este como el punto de falla donde cualquier resistencia residual del material no es considerada para cálculo de la misma.

Una vez finalizado cada ensayo se retiraron los escombros dejando las superficies limpias y se procedió a dar inicio al siguiente ensayo de compresión hasta finalizar todas las probetas de mezcla base (M1, M2 y M3) y óptima (M4, M5 y M6)

8. Conclusiones

En el estado del arte y la revisión bibliográfica aparece cierto nivel de concordancia con las composiciones porcentuales de los materiales, donde la arcilla o material de aporte a la cohesión no puede ser inferior del 15% y el material granular no puede ser superior al 50% de la mezcla.

Los ensayos de compactación modificada (Proctor) son importantes porque aparte de determinar el contenido de agua óptimo al cual se debe preparar la mezcla, es un parámetro de control en el proceso de compactación y curado proporcionando información de satisfacción o insuficiencia de la aplicación de energía o resistencia de los moldes, también brinda un dato base para generar rangos comparativos entre a densidad obtenida de mezclas con diferentes composiciones porcentuales. Es importante recordar que la densificación de un material está correlacionada con la resistencia a compresión, corte y estabilidad, también el reducir la relación de vacíos permite controlar la permeabilidad y agrietamiento de las mezclas.

Al comparar la densidad máxima obtenida en las probetas M1, M2 y M3, compactada en Máquina Universal contra la densidad máxima generada con el martillo del ensayo Proctor, se concluye que la aplicación de carga en que se programa la Máquina Universal no es suficiente, ya que existe una diferencia aproximada del 10% entre las densidades, sin embargo, antes de incrementar la fuerza aplicada hay que asegurarse que el molde del ensayo resista la presión interna del mismo, ya que de no ser así la deformación del molde genera fisuración interna de los especímenes compactados.

El procedimiento experimental para el curado de probetas cumple con el objetivo, ya que no se presentó retracción rápida inicial, fisuración o agrietamiento excesivo. En los primeros 7 días de curado en cuarto oscuro las probetas muestran una pérdida de humedad máxima del 1%; en los siguientes 14 días de secado al aire presentan una pérdida aproximada del 70%

Se concluye que la adición del concreto reciclado al suelo, no mejora la resistencia a compresión axial de la misma, por el contrario, genera disminuciones aproximada del 50% del esfuerzo máximo soportado por la mezcla compactada, lo que posiblemente suceda debido a que el cemento reciclado es un material ya estabilizado químicamente y con el simple proceso de compactación no aporta la resistencia esperada, pues su comportamiento es similar al de una arena, lo cual disminuye la cohesión necesaria para la mezcla.

A pesar que el suelo es una materia prima natural y que desde la antigüedad se trabaja con ella, se evidenció que no es tan sencillo obtener la resistencia mínima requerida por las diferentes normas en cualquier mezcla. En esta investigación la única mezcla que alcanza la resistencia mínima requerida > 1.0 MPa en la muestra M2 definida como la mezcla óptima de la investigación.

Se comprobó que el concreto reciclado como material fino implementado para rellenar espacios vacíos en la mezcla de suelo y evitar las desventajas que genera el uso de la arcilla como retracción y desgaste a la intemperie no proporciona la cohesión necesaria para obtener valores de resistencia significativos. Por lo anterior se hace

necesario continuar con la búsqueda de materiales costo efectivo que promuevan un mejoramiento del material.

En las mezclas M4 y M5 con un porcentaje de concreto reciclado del 50% y 30% respectivamente, se observa que el contenido de concreto reciclado afecta la etapa inicial de 7 días del curado en cuarto oscuro pues presenta una mayor absorción de la humedad aproximadamente 3.4%, aun así, no se observa que la retracción o fisuración del material sea crítica.

9. Bibliografía

- [1] Ramírez, A. (2015). La construcción sostenible. *Física y sociedad*. España. 30-33. Recuperado de: http://procurementnotices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376.
- [2] Naciones Unidas. (2019). *Informe de los objetivos del desarrollo sostenible*. Recuperado de: https://downloads.ctfassets.net/27p7ivvbl4bs/2gni7rFTc40OQzIODjx9NX/1c2b74b0ffdf4b9b3763ed6b516d343/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf.
- [3] Norma técnica Peruana E.080. Diseño y construcción con tierra reforzada (2017). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Recuperado de: http://procurementnotices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376.
- [4] Hernández, J (2016). *Construcción con tierra: Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal* (Tesis de pregrado). Departamento de tecnología de arquitectura, Barcelona. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/107822/tfg_josune%20hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2017). *Resolución 0472 – Gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD*. Recuperado de: http://procurementnotices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376.
- [6] Mercante, I (2007). Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental. *Revista científica*. Vol. 11 N°2. Recuperado de: <http://dspace.uces.edu.ar:8180/xmlui/handle/123456789/152>.

- [7] Aguja, Elisa e Hincapié, A (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista Universidad EAFIT*. Medellín. Vol. 39.
- [8] Cruz, C. y Masson, O (2006). *Elaboración de mampuestos con residuos reciclados de la construcción civil y comparación con las normas INEM y ASTM* (Tesis de pregrado). Escuela politécnica del ejército. España. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/2153>
- [9] Minke, G (2001). *Manual de construcción en tierra*. Libro. Kassel. ISBN 9974-49-347-1. Recuperado de: <http://permaconstruccion.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual-Construccion-En-Tierra-Minke.pdf>
- [10] Saroza, B. Rodríguez, M y Menéndez, J (2008). *Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Cresencio Valdés, Villa Clara*. Informes de la construcción. Cuba. vol. 60 Pág. 42.
- [11] Medina, K. Medina, O. y Gutiérrez O (2011). *Bloque de tierra comprimida como material constructivo* (tesis pregrado). Revista Facultad de Ingeniería, UPTC. Tunja. vol.: 20. Pág. 60. Recuperado de: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1421>
- [12] Quiroz, L (2011). *Evaluación de modelos de comportamiento no lineal para materiales de tierra con aplicación al adobe* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Recuperado de: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_bec09ba19582b3f35edee01e57bb15ec
- [13] Herreras, E (2016). *Estudio sobre la influencia del proceso de curado en elementos de construcción mediante tierra* (tesis pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107380>

[14] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS (2013). *INV E-122-13 - Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado*. Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

[15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. *NTC-77 - Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*.

[16] Instituto Nacional de Vías- INVÍAS (2013). *INV E-125-13 Determinación del límite líquido de los suelos*. Recuperado de:

<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

[17] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS (2013). *INV E-126-13 límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*. Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>.

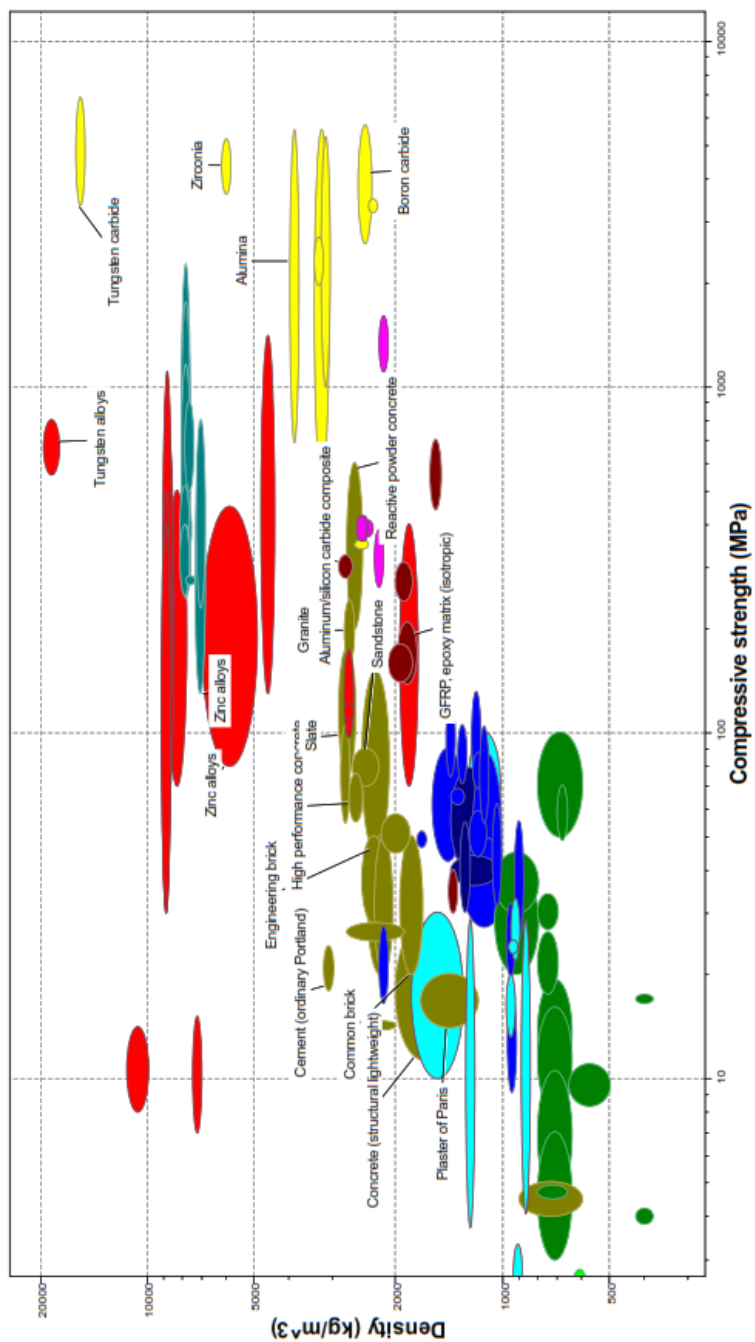
[18] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS (2013). *INV E-142-13 relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)*. Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>.

[19] Pichazaca, M y Saldaña, P (2015). *Elaboración de panel prefabricado con residuos cerámicos*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca. Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21790>

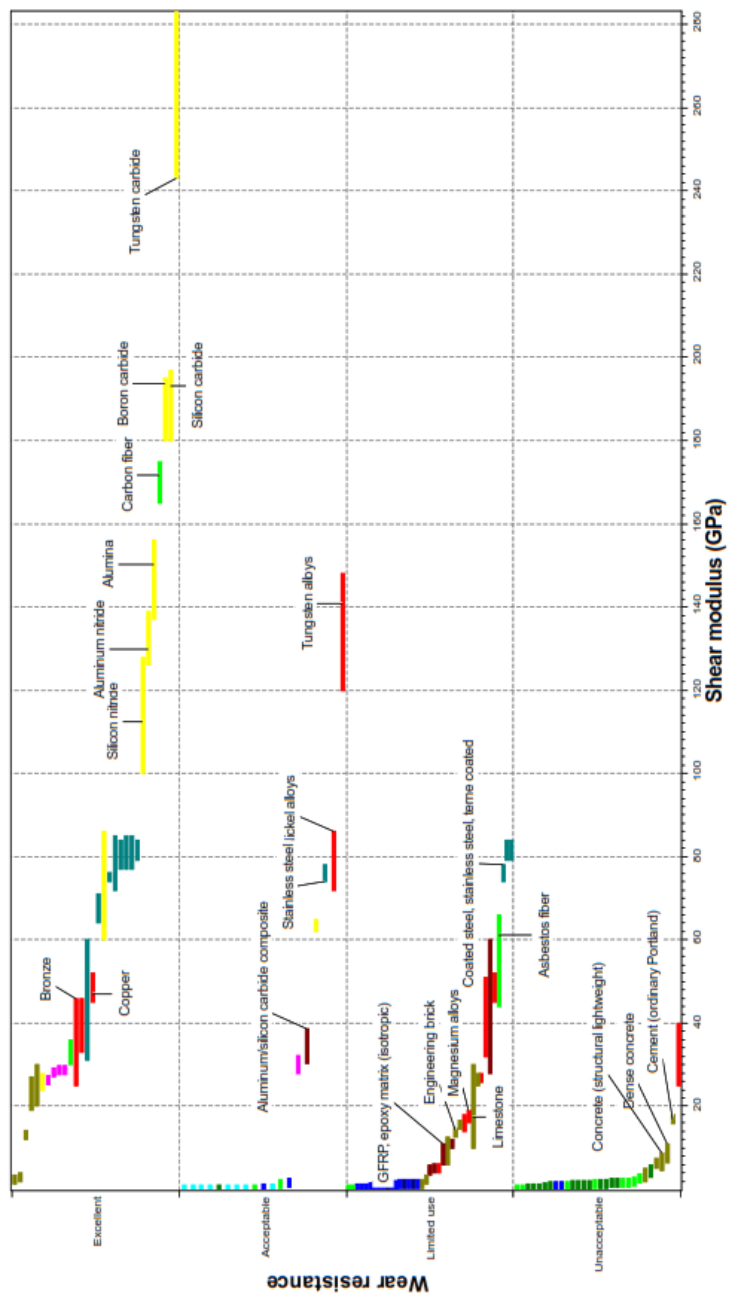
[20] Mazarron, J. y Cañas, I (2011). *Normativas de construcción con tierra en el mundo. Informes de la construcción*. Madrid. Vol. 63. p. 159-169.

ANEXOS

Anexo 1: gráfica ces edupack Relación de materiales modulo arquitectura. Densidad (kg/m³) vs esfuerzo a compresión (MPa)



Anexo 2: gráfica ces edupack. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al agua (kg/m3) vs módulo de cortante (GPa)



Anexo 3: gráfica ces edupack. Relación de materiales modulo arquitectura. Resistencia al ambiente rural (kg/m3) vs módulo de cortante (GPa)

