



**“VALORACIÓN DE LAS CENIZAS DE CARBÓN
PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
MEDIANTE ACTIVACIÓN ALCALINA Y SU USO
EN VÍAS NO PAVIMENTADAS”**

**Trabajo de Grado
Para optar al título de Ingeniero Civil**

Daniel Morales Zuluaga

Asesores:

Gloria Isabel Carvajal Peláez

Yhan Paul Arias Jaramillo;

Universidad de Medellín

Facultad de Ingenierías

Ing. Civil – Medellín

2015

RESUMEN

En Colombia la red vial terciaria está constituida en material de afirmado y se encuentra en un estado crítico por falta de mantenimiento debido a los bajos recursos de inversión para la infraestructura vial. Este trabajo se realizó con el propósito de evaluar materiales estabilizantes alternativos para la red terciaria.

La ceniza de carbón es uno de los mayores residuos generados por las industrias, por lo que se cuenta con una gran cantidad de este material para su disposición. Este residuo ha demostrado poseer propiedades puzolánicas mediante una activación alcalina; es por esta razón, que se hizo necesario la realización de este trabajo con el objetivo de evaluar, estimar y determinar el comportamiento mecánico de las cenizas de carbón como estabilizante de suelos y evaluar su capacidad para resistir las cargas transmitidas por los vehículos.

Se analizó el efecto que tiene una ceniza de carbón activada alcalinamente en diferentes tipos de suelos mediante el ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS, por sus siglas en inglés).

En el documento, se presentan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos Proctor Modificado y UCS de suelos de arcilla, arenilla y además un suelo representativo de la vía de estudio en el proyecto Red INNOVIAL del Municipio de Urrao, el cual se denomina "Urrao". Todos los suelos fueron adicionados con ceniza de carbón en porcentajes de 7%, 14% y 21%, fallados y curados a la edad de 7 días.

Mediante el análisis estadístico se analizaron los resultados para identificar los factores que más influyen sobre la variable respuesta en cada uno de los suelos. Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por los diferentes tipos de suelo y las dosificaciones de ceniza de carbón utilizadas en el estudio, además de la influencia del tipo de activador alcalino que se utilizó.

Se encontró que la ceniza de carbón para mezclarse con los suelos de arenilla, arcilla y Urrao debe ser tamizada por malla N°100 o mayor y usar hidróxido de sodio en solución como activador alcalino a una concentración cercana a 8 MOLAR para obtener un material cementante con características comparables con la norma INVIAS Artículo - 350.4.1.

Finalmente se realizaron conclusiones y recomendaciones con relación al tema.

ABSTRACT

With the purpose of obtaining a new stabilizing material for tertiary network in Colombia, which is built on material footing and is in a critical condition from lack of maintenance due to poor investment for road infrastructure, this paper discusses the purpose of evaluating alternative stabilizing materials for tertiary network.

The coal ash is one of the largest waste generated by industries, so it has a lot of this material for disposal. This residue was shown to possess pozzolanic properties with an alkaline activation. This was the reason that the realization of this work was necessary in order to evaluate, estimate and determine the mechanical behavior of coal ash as a soil stabilizer and assess their ability to withstand the loads transmitted by the vehicles.

It was analyzed the effect of an alkali activated coal ash in different soil types over the Unconfined Compression Strength (UCS).

The results of the modified Proctor test and UCS of clay soils, and sand are presented and discussed and a representative soil pathway study in Red INNOVIAL project of the Municipality of Urrao, which it will be called "Urrao", all soils are added with coal ash with the variety of 7%, 14% and 21% and 7 days later it's UCS is determined.

By statistical analysis, the results are analyzed to identify the factors that influence the most on the variable response in each soil. A comparison was made between the results obtained by different soil types and dosages of coal ash used in the study, in addition to the influence by the kind of alkali activator that was used.

It was found that in order to coal ash to mix with gravel, clay and Urrao soils must be filtered by No. 100 mesh or more and using sodium hydroxide as an alkaline activator solution at a concentration close to 8 MOLAR to obtain a cementitious material with characteristics comparable with the INVIAS Standard, Article - 350.4.1.

Finally conclusions and recommendations were made regarding the issue.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. ANTECEDENTES	8
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
1.3. JUSTIFICACIÓN	9
1.4. OBJETIVOS	10
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	10
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. MARCO DE REFERENCIA	11
2.1. ESTADO DEL ARTE	11
2.1.1. MATERIALES PUZOLÁNICOS	12
2.1.2. GEOPOLÍMEROS	13
2.1.3. ACTIVADORES ALCALINOS	18
2.1.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	20
2.2. MARCO TEÓRICO	21
2.2.1. LOS SUELOS	21
2.2.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS	23
2.2.3. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DEL SUELO	27
2.2.4. COMPACTACIÓN DE SUELOS	29
2.2.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)	34
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CARBÓN	35
3.1.1. ENSAYOS FÍSICOS	35
3.1.2. ENSAYOS QUÍMICOS	35
3.1.3. ENSAYOS MINERALÓGICOS	35
3.2. ACTIVADOR ALCALINO	36
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	36
3.3.1. ARCILLA Y URRAO	36
3.3.2. ARENILLA	36
3.4. ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO	36
4.2. PROBETAS DE ENSAYO	37
4.3. MÉTODOS DE CURADO	38

4.3.1.	CURADO AMBIENTE (20°C – 30°C; AMBIENTE)	38
4.3.2.	CURADO EN HORNO (40°C – 50°C; MAYOR A 95%)	39
4.3.3.	CURADO EN BAÑO MARÍA (40°C – 50°C, AMBIENTE)	39
4.3.4.	CURADO EN CUARTO HÚMEDO (20°C – 30°C, MAYOR A 95%)	40
4.4.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)	40
5.	RESULTADOS	41
5.2.	CLASIFICACIÓN	41
5.2.1.	CENIZA DE CARBÓN	41
5.2.2.	ARCILLA	45
5.2.3.	URRAO.....	46
5.2.4.	ARENILLA.....	47
5.2.5.	GRANULOMETRÍAS.....	48
5.2.6.	CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES (AASHTO)	49
5.3.	PROCTOR MODIFICADO	52
5.3.1.	URRAO.....	52
5.3.2.	ARCILLA	53
5.3.3.	ARENILLA.....	54
5.4.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)	54
5.4.1.	TABLAS DE RESULTADOS	56
5.4.1.1.	CORRIDA 1	56
5.4.1.2.	CORRIDA 2.....	57
5.4.1.3.	SUELOS PATRÓN.....	58
5.4.1.3.1.	PATRÓN CON AGUA.....	58
5.4.1.3.2.	PATRÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO 3.5 M.....	58
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
6.2.	PROCTOR MODIFICADO	59
6.2.1.	URRAO.....	59
6.2.2.	ARCILLA	59
6.2.3.	ARENILLA.....	60
6.3.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)	60
6.3.1.	COMPARACIÓN NaOH vs H ₂ O	60
6.3.2.	ANÁLISIS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES	62
6.3.2.1.	CORRIDA 1.....	62

6.3.2.2.	CORRIDA 2.....	65
7.	DISEÑO ALTERNATIVO.....	69
7.2.	RESULTADOS	69
7.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
7.3.1.	ARENILLA.....	71
7.3.2.	ARCILLA	72
7.3.3.	URRAO.....	72
7.3.4.	URRAO – CCOLTEJER Vs CEMENTO PÓRTLAND	73
8.	CONCLUSIONES.....	73
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	76

1. INTRODUCCIÓN

El suelo que sostiene las cargas transmitidas por la superficie de rodadura de una vía debe encontrarse en condiciones tales, que sea competente para resistirlas, cuando se da el caso de que no posee las características apropiadas para hacerlo se opta por cambiar el suelo por otro que si posea esas características o por realizar una estabilización para modificar sus propiedades naturales.

En la construcción de vías no pavimentadas, con el propósito de economizar costos se suele realizar un descapote y dejar el terreno natural como capa de rodadura; el cual no en todos los casos es el más apropiado para resistir las cargas, lo que produce un aumento en los costos a largo plazo. Esto debido al continuo mantenimiento que debe realizarse para mantener la vía en unas condiciones aceptables para la circulación de vehiculos.

En otros casos, se utiliza material de canteras cercanas al proyecto que pueden llegar a encontrarse con baja calidad por la misma dificultad de acceso que poseen las zonas aledañas a la red terciaria. Es por esta razón, que se crea la necesidad de obtener un material estabilizante para este tipo de suelos, como la ceniza de carbón .

Este trabajo hace parte del proyecto “Procesos de Transferencia e Innovación Tecnológica para la Construcción Sostenible de Vías Terciarias” de la Red INNOVIAL, se centra en la estabilización de suelos con ceniza proveniente de una industria ladrillera localizada en Medellín, la ceniza utilizada se denominará “CC” (Ceniza de Carbón) y su caracterización se entregará mas adelante, esta nomenclatura se asigna con el fin de no entrar en discusión si la ceniza corresponde a ceniza volante o ceniza de fondo, ya que estas son definidas a partir de fuentes de centrales termoelectricas, y la ceniza utilizada en esta tesis corresponde a un subproducto del proceso de quema de ladrillos.

Se pretende que este trabajo sea una iniciativa para seguir evaluando a mayor profundidad el uso de las cenizas de carbón como material alternativo para la estabilización de suelos, su uso en vías no pavimentadas y contribuir con posteriores estudios.

En el desarrollo de esta investigación se evaluó la resistencia mecánica con el efecto del tipo de curado, la cual contó con dos temperaturas, dos humedades, tres porcentajes de ceniza de carbón y tres tipos de suelos: arenilla, arcilla de cantera y suelo de Urrao), donde todas las muestras se fallaron a una edad de 7 días de curado.

La resistencia mecánica se evaluó mediante ensayos de resistencia a la compresión no confinada en probetas con 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, elaboradas con la humedad y densidad óptima obtenidos de los ensayos de Proctor Modificado y compactadas con un gato hidráulico.

Se obtuvieron resultados definitivos donde demostraron que la mejor dosificación para humedades mayores al 95% era de 14% de la ceniza de carbón utilizada y de 7% para humedad ambiente.

1.1. ANTECEDENTES

El suelo es el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesto junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas (Braja M, Das, 1999), éste se encarga de sostener las cargas transmitidas por la superficie de rodadura en las vías y debe encontrarse en condiciones tales que sea competente para resistirlas, cuando los suelos no poseen las propiedades adecuadas por sí solos, se opta por cambiar el suelo por otro que sí posea las propiedades adecuadas o por realizar una estabilización para modificar sus propiedades naturales.

Analizando las gráficas estadísticas del buscador Scopus, con las palabras de búsqueda “stabilisation + coal ash” consultado en Octubre del 2014, se puede concluir que los estudios sobre la estabilización de suelos han venido experimentando un importante crecimiento desde el año 2000, donde se han utilizado diferentes residuos de las industrias para mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los suelos, logrando reutilizar estos materiales; los suelos estabilizados constituyen capas uniformes, de calidad, con mayor durabilidad e insensibles al agua (Murthy, 2002).

Países como España han desarrollado normas para la estabilización de suelos a base de cemento y cal (Jofré & Kraemer, 2008), al igual que la National Lime Association en Estados Unidos para la estabilización de suelos tratados con cal, donde se describe detalladamente la composición química y el proceso constructivo de este estabilizante (National Lime Association, 2004).

En Europa el empleo de las cenizas de carbón se ha visto influenciada por nuevas normas y legislaciones medioambientales. En el año 2010 la Directiva Marco de Residuos, 2008/98/CE que planteó regular éste residuo fue implementada, donde los estados miembros tuvieron que definir qué producto de la combustión del carbón es un sub-producto y cuando un material perderá la condición de residuo; a partir de esto los productores que desearán colocar los productos de la combustión en el mercado, deben haber registrado sus productos de acuerdo al Reglamento, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (REACH) (Cedex, 2011).

El reglamento REACH es una reforma de las condiciones de comercialización y de utilización de las sustancias y preparados químicos que busca garantizar la protección de la salud humana y del medio ambiente, así como la libre circulación de sustancias en el mercado interior (“Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH),” 2006); De esta manera se puede formalizar el proceso para recibir los residuos provenientes de las empresas, teniendo una garantía de que estos residuos serán pertinentes para su posterior reutilización.

En Colombia el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) publicó en el año 2005 una guía para el diseño y construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos (Bogotá, 2005), sin embargo, no incluye activación alcalina ni cenizas de carbón y sólo es implementada como una guía y no como una normativa; La normativa para la construcción de vías en Colombia está establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), cual además,

establece requisitos para la estabilización de vías con emulsión asfáltica, cemento y concreto hidráulico (Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras - Sección 3.4, 2007), este tipo de estabilizaciones conllevan un alto costo de producción y construcción, debido a que las vías terciarias cuentan con muy pocos recursos (MINTRANSPORTE, 2011), no es común encontrar vías estabilizadas con este tipo de tratamientos y no existe normativa que regule otro tipo de estabilización.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia existe la normativa INVIAS, la cual establece requisitos para estabilizar suelos con emulsión asfáltica, cemento y concreto hidráulico (“Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras - Sección 3.4,” 2007), pero es necesario buscar nuevas alternativas de estabilización cuando se trata de vías terciarias, debido a que se cuenta con muy pocos recursos para su construcción y por esta razón se encuentran en estados críticos debido al uso de agregados sin tratar, o de la sub rasante como superficie de rodadura (MINTRANSPORTE, 2011), y los requisitos establecidos por la norma son para estabilizantes de altos costos de producción. No existe una normativa en Colombia que establezca requisitos que deben cumplir materiales alternativos para la estabilización de suelos, cuando existe gran cantidad de residuos de las industrias destinados a botaderos que podrían ser reutilizados como materiales estabilizantes.

En la estabilización de suelos se han utilizado diferentes residuos provenientes de las industrias, donde se obtuvieron resultados ambientalmente viables y requisitos mecánicos, físicos y químicos satisfactorios, lo que ha dado como resultado nuevas alternativas de materiales para ser utilizados en la construcción vial (Asi, 2001; Choobbasti et al., 2010; Eisazadeh, Kassim, & Nur, 2011; Iyengar et al., 2013; Puppala, Griffin, Hoyos, & Chomtid, 2004; Sabat, 2012; Senol, Edil, Bin-Shafique, Acosta, & Benson, 2006; Sobhan & Mashnad, 2003), ésta tesis se centra en la evaluación de las cenizas de carbón como estabilizante de suelos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a estadísticas reportadas por el Ministerio de Transporte en el año 2011, Colombia contaba con 128.000 km de vías, de los cuales 111.364 km pertenecían a la red secundaria y terciaria, estos estaban distribuidos en un 73% a cargo de las entidades territoriales, 18% a cargo de la Nación a través de la Subdirección de la Red Terciaria y Férrea del INVIAS, y el 8.3% es del sector privado, para el año 2013 de acuerdo a las estadísticas reportadas por (FEDESARROLLO, 2013), la red vial de Colombia ya era de aproximadamente 165.403 kilómetros y la red terciaria representaba la mayor cantidad de kilómetros de la red nacional con 126.154 km, lo que ha mostrado el importante aumento de la construcción de vías en el país, teniendo un aumento del 48% entre el año 2011 y el año 2013 en total de vías. La red vial se encuentra en un estado crítico, sobre todo la red terciaria, estas se han venido deteriorando por la falta de mantenimiento debido a que los departamentos y la Nación cuentan con bajos recursos de inversión para la infraestructura vial (MINTRANSPORTE, 2011), por esta razón, se crea la necesidad de evaluar nuevos materiales

resistentes, de bajo costo de producción y mantenimiento como estabilizantes de vías en afirmado para la red terciaria del país. Para este trabajo de investigación se plantea la reutilización de las cenizas de carbón como material estabilizante.

Existen muchos residuos provenientes de las industrias que pueden ser utilizados como estabilizantes de suelos como lo es la ceniza producto de la combustión de la cascarilla de arroz (Choobbasti et al., 2010), ácido fosfórico y cal (Eisazadeh et al., 2011), polímeros comerciales (Iyengar et al., 2013), cemento (Puppala et al., 2004), residuo de polvo de cerámica (Sabat, 2012), ceniza volante (Senol et al., 2006), cenizas volantes con tiras de plástico (Sobhan & Mashnad, 2003), entre otros. Este trabajo de investigación se enfoca en el uso potencial de la ceniza de carbón proveniente de una ladrillera, la cual solo será tamizada por una malla para reducir contaminantes por otros residuos.

La producción de carbón en Colombia ha registrado crecimientos permanentes durante el estudio registrado por la (Energía, 2006), presentando aumentos notorios del orden de 17 Mt entre 1980-1990 y de 32 Mt entre 1990-2004, mientras que el consumo presentó un crecimiento del 39.6% entre 1980-1993 y disminuyó a 1.9 Mt para el año 2005, sin embargo gran parte de este residuo continúa siendo destinado a botaderos, generando graves problemas de contaminación (William, Thiery, Schuller, & Subway, 1981). Al ser un residuo que se genera en grandes cantidades, se plantea evaluar su uso y establecer las condiciones físicas, químicas y mecánicas, para la creación de estabilizantes a base de cenizas de carbón.

En suma se busca valorizar la aplicación de las cenizas de carbón como estabilizantes de suelo en vías terciarias, y de esta manera disminuir la contaminación generada por la baja disposición de estos residuos, a través de la reutilización de este material en obras de infraestructura, que permitan mejorar el estado crítico en que se encuentran las vías terciarias del país.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del método de curado en el comportamiento mecánico de mezclas de suelo adicionadas con ceniza de carbón y activadas alcalinamente; con el fin de determinar las mejores condiciones para su uso en vías no pavimentadas.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir mediante ensayos Proctor modificado la humedad óptima necesaria para obtener la densidad máxima de las mezclas a evaluar.
- Determinar la resistencia mecánica mediante ensayos de resistencia a la compresión no confinada de mezclas estabilizadas con cenizas de carbón y activación alcalina.

- Evaluar los efectos de humedad, temperatura y tiempo de curado sobre la resistencia de las mezclas, y definir las mejores condiciones para su uso en vías terciarias.

2. MARCO DE REFERENCIA

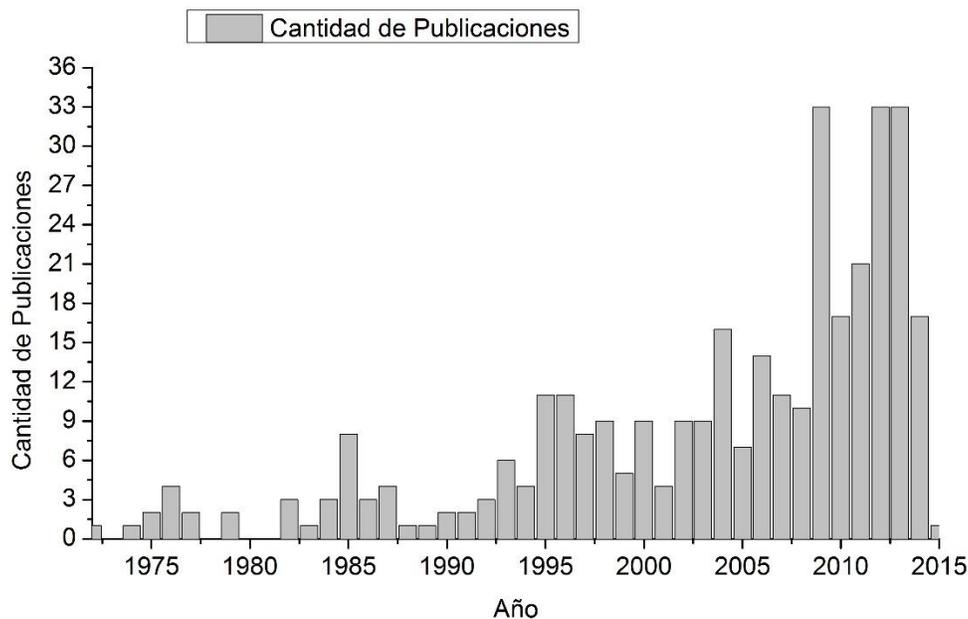
2.1. ESTADO DEL ARTE

Para determinar el estado del conocimiento en esta temática, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Palabras clave:* “stabilisation + coal ash”
- *Bases de datos consultadas:* Science Direct
- *Número de artículos consultados:* 259
- *Artículos analizados:* 25

Dicha información fue consultada en el año 2014 y los resultados se presentan en la Gráfica 1; de los 259 artículos se seleccionaron 25 artículos por ser los que se consideran constituyen un aporte fundamental para la investigación.

Gráfica 1: Investigaciones



La búsqueda arrojó indicadores estadísticos, de los cuáles se reporta que la estabilización de suelos mediante cenizas volantes ha tenido un incremento desde el año 2000, y ha superado en cantidad de artículos a otros materiales estabilizantes como lo son el cemento, las escorias, el metacaolín, el humo de sílice, las cenizas de cascara de arroz, entre otros; Lo que muestra la necesidad que ha tenido el mundo en darle uso a este residuo y el potencial que este posee.

A continuación se presentan las temáticas más relevantes.

2.1.1. MATERIALES PUZOLÁNICOS

Son materiales silíceos o aluminosilíceos que reaccionan químicamente con cal hidratada a temperatura normal y en presencia de humedad para formar un material resistente, de endurecimiento lento con dos inconvenientes: son más lentos para formarse y pueden ser intolerantes a impurezas como las arcillas, iones metálicos, sulfuros, fosfatos, etc. (Petermann & Saeed, 2012)

- CENIZAS DE CARBÓN

Las cenizas de carbón catalogadas como puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que reaccionan químicamente con cal hidratada a temperatura ambiente y en presencia de humedad para formar un material resistente, de endurecimiento lento con dos inconvenientes: son más lentos para formarse y pueden ser intolerantes a impurezas como las arcillas, iones metálicos, sulfuros, fosfatos, etc. (Petermann & Saeed, 2012). Esta tesis se fundamentó en el uso de cenizas de carbón como puzolana que actúa como material cementante y permita obtener un suelo de mejores características mecánicas.

Las cenizas de carbón se pueden dividir en cenizas de fondo, cenizas volates (definidas así por la norma ASTM) y combinados; las cenizas de fondo son residuos que se encuentran en el fondo de las calderas y poseen diámetros de partícula mayores a 0.075 mm (retenido malla N°200) característicos del carbón inquemado, este residuo es más usado en estudios como material de *filler* (del inglés “relleno”) ya que no posee un alto potencial puzolánico; las cenizas volantes son residuos que quedan atrapados en los filtros de las calderas y poseen diámetros menores a los 0.075 mm (pasante malla N° 200), este ha demostrado lograr reacciones en microestructuras cristalinas y amorfas a partir de la síntesis de aluminosilicatos alcalinos con una solución activadora de hidróxido alcalino y silicato alcalino, a este producto se le llama geopolímero (Petermann & Saeed, 2012), lo que quiere decir que puede lograr obtener propiedades puzolánicas similares a las del cemento Pórtland.

Las cenizas de carbón pueden llegar a utilizarse para sustituir el cemento Pórtland al activarse con una solución alcalina (Ryu, Lee, Koh, & Chung, 2013), se han obtenido resistencias de hasta 7000 kPa combinando 10% de cemento y 10% de ceniza de carbón y 80% de suelo (Sobhan & Mashnad, 2003), los sistemas cementantes basados en cenizas de carbón activadas son menos susceptibles de generar la expansión por la reacción álcali-sílice que el cemento Pórtland (García-Lodeiro, Palomo, & Fernández-Jiménez, 2007).

Las propiedades que puede aportar la ceniza volante al material son a menudo mejores que las del cemento Pórtland, por lo que este material puede ser de gran ayuda cuando se desea reemplazar la utilización de este cemento. (Skvara, Jilek, & Kopecky, 2005)

La ceniza de carbón utilizada en este estudio se clasifica como un material puzolánico, sin embargo, se trabajó activándola alcalinamente, en el que se buscó que los materiales más finos formaran los geles cementantes, mientras que los más gruesos sirvieran como material de filler y ayudaran a crear una estructura más compacta.

- FINURA DE LA CENIZA

Las partículas más pequeñas de los materiales puzolánicos son más reactivas en la solución, una de las razones es que estas tienen una mayor superficie de contacto con sustancias químicas. Los materiales con grandes cantidades de partículas finas producen cementos con menor porosidad y resistencias mecánicas superiores. (Kong & Sanjayan, 2008)

En la literatura la finura Blaine se define como la finura de los materiales granulares tales como el cemento y las puzolanas, y se expresan como la superficie total en centímetros cuadrados por gramo, el cual se determina por el dispositivo de aire-permeabilidad de Blaine. Consultado en (“Termwiki,” Octubre de 2014).

La finura de Blaine óptima para las escorias de alto horno varía entre 4.000 cm²/g y 5.500 cm²/g; Valores por encima de los 5.500 cm²/g tienen poco efecto sobre la resistencia mecánica de los materiales.(Kong & Sanjayan, 2008)

El estudio de (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, & Jalali, 2008) contradice el estudio de (Kong & Sanjayan, 2008), debido a que los resultados obtenidos muestran que al tener una mayor finura en los materiales también se exige una hidratación adicional, lo que conduce a un aumento de la porosidad y una menor resistencia mecánica.

En el estudio desarrollado por (Petermann & Saeed, 2012) se realizaron pruebas de resistencia a la compresión de dos cenizas volantes diferentes: una de ellas ceniza volante evaluada sin modificar las condiciones dadas por el proveedor mientras el otro ensayo se realizó a la misma ceniza pero tamizando de tal manera de eliminar las partículas mayores de 45 μm de diámetro; Como resultado se demostró que el estudio realizado por (Kong & Sanjayan, 2008) era verídico, ya que las resistencias de las muestras tamizadas dieron una mayor resistencia a la compresión, por lo que las muestras con material granular más fino tienden a tener resistencias mecánicas superiores.

2.1.2. GEOPOLÍMEROS

Se podría afirmar que las primeras aplicaciones de los cementos activados alcalinamente datan de la época de los romanos, donde éstos utilizaban en sus morteros de pega, materiales conglomerantes producto de las cenizas volcánicas (ricas en SiO₂ y Al₂O₃) con cal apagada (Ca(OH)₂), logrando con esta mezcla de materiales en estado húmedo procesos similares a lo descrito anteriormente.

Aunque el desarrollo del cemento Pórtland mostró grandes avances en el último siglo, algunos ingenieros y científicos comenzaron a experimentar con nuevos materiales para dar respuesta a la demanda de estos en épocas de la postguerra, es así como a través de la historia las primeras investigaciones reportadas en la literatura sobre los mecanismos de activación aparecen en la Europa del este, en 1930 Khul investiga el fraguado de escorias de alto horno en presencia de disolución de $K(OH)$, años más tarde en 1937 Chassevent, mide la reactividad de escoria de alto horno usando disoluciones de $K(OH)$ y $Na(OH)$. En 1940 Purdon investiga los cementos de escoria de alto horno (sin adición de Clinker) y disoluciones de $Na(OH)$ o sales alcalinas. En 1957 Gluwkowsky Sintetiza cementos usando aluminatos hidratados (arcillas) y anhidros (rocas vítreas, escorias metalúrgicas, entre otras) y álcalis, y propone cementos en el sistema $Me_2O-MeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ que denomina "soil cement". Para principios de 1980 se retoma el tema y se acuña el término "geopolímeros" mediante el cual en 1982 Davidovits llamó los sistemas $Me_2O-MeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ usando metacolín como materia prima, así como diversas mezclas de caliza. (Arias Jaramillo, 2013)

Aunque el término "geopolímeros" ha sido una fuente de discusión para algunos investigadores del tema, ya que se puede utilizar la misma palabra para describir procesos de polimerización de materiales orgánicos bajo condiciones geotérmicas (Fernández-Jiménez, Palomo, & Criado, 2005), es usado también de forma genérica para describir los productos amorfos o cristalinos de la reacción de síntesis de aluminosilicatos alcalinos a partir de la reacción con hidróxido y soluciones alcalinas, estos compuestos son también comúnmente conocidos como; "vidrios de aluminosilicato de baja temperatura.", "cemento activado alcalinamente ", "geocement", "cerámica-alcalina", "polímero inorgánico de hormigón", e "hidrocerámica". A pesar de la variedad de nomenclaturas, todos estos términos detallan materiales que han sido sintetizados utilizando la misma química, describiéndolo como un sistema complejo de reacciones de disolución y precipitación en un sustrato acuoso de elevada alcalinidad (Duxson et al., 2006)(Jhon L. Provis, Grant C. Lukey, 2005).

Sin embargo, estos términos no se usan en muchas investigaciones debido a su limitada aplicabilidad en la descripción de un sistema complejo, donde las razones pueden estar asociadas a que el término geopolímero implica una nomenclatura para la formación de compuestos de polisialato y estos solo pueden presentarse con relaciones Si/Al con números enteros. Lo que demuestra que no es posible obtener totalmente polisialatos en los sistemas activados alcalinamente, ya que se presenta una amplia gama de estructuras. (Fernández-Jiménez et al., 2005)

De forma frecuente las diferentes investigaciones en torno al tema de geopolímeros reportan que muchas de las características macroscópicas pueden parecer similares a las del cemento Pórtlan, pero su microestructura, propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas varían en gran medida, dependiendo principalmente de la materia prima que se utilice para conformar los compuestos. (Shi, Jiménez, & Palomo, 2011)

Dependiendo de la selección de materias primas y las condiciones de procesamiento, los geopolímeros pueden exhibir una gran variedad de propiedades y características, incluyendo alta resistencia a la compresión llegando incluso a reportar resistencias del orden de 60MPa, baja contracción, fraguado rápido o lento, resistencia a los ácidos, resistencia al fuego y baja conductividad térmica. Pero está claro que todas estas propiedades mencionadas dependen de las mezclas que se elaboren, es decir el tipo de aluminosilicato utilizado y sus correspondientes activadores, por lo tanto algunos investigadores sugieren (Shi et al., 2011) que los polímeros inorgánicos no deben considerarse una panacea universal para todos los problemas de selección de material, sino más bien una solución que puede ser adaptada de acuerdo a la mezcla correcta y al adecuado diseño del procesamiento para optimizar las propiedades y / o reducir los costos para una aplicación dada.

Numerosas aplicaciones a nivel industrial de cementos elaborados a partir de la activación alcalina se destacan por su tiempo de servicio: como es el caso de viviendas residenciales en Mariupol, Ucrania en 1960. Edificios residenciales en Lipetsk, Russia, 1987. Edificios con Purdociment en Bélgica, 1950. Muros de contención para puentes en Melbourne, Australia, entre otros.

En esta investigación se ha decidido llamar el proceso “activación alcalina de cenizas de carbón”, para no entrar en discusión con las diferentes nomenclaturas utilizadas.

La geopolimerización es una reacción de síntesis entre hidróxidos alcalinos que pueden ser de tipo: NaOH, Ca(OH)₂, K(OH) y minerales que presenta alta composición en aluminosilicatos como cenizas de carbón y escorias de horno, que combinados dan lugar a la formación de geles con características cementantes llamados geopolímero. (Petermann & Saeed, 2012)

Los geopolímeros se forman a partir de una serie de procesos de reacción, desde una puzolánica hasta un desarrollo microestructural final; El desarrollo del geopolímero se da en los procesos de disolución, polimerización y crecimiento. (Valenzuela Herrera, 2013)

Las cenizas volantes están formadas por óxidos ácidos tales como Al₂O₃, SiO₂ y Fe₂O₃, los cuales proporcionan la posibilidad de una reacción alcalina.(Williams et al., 2002) (Petermann & Saeed, 2012)

La distribución de partícula y la finura de las partículas son las características físicas que más afectan la reactividad, mientras que el contenido relativo de sílice afecta más desde el punto de vista químico. La sílice altamente reactiva en las cenizas volantes aumenta la posibilidad de formación del gel de aluminosilicatos que proporcionan la resistencia mecánica a los geopolímeros. Los factores que afectan la ceniza volante al ser activada se debe al porcentaje de material no quemado, que como partículas inertes causan un aumento en la relación líquido/sólido y el contenido de su fase vítrea (Chen & Brouwers, 2006); Además se encontró que las cenizas volantes con un contenido de SiO₂ y Al₂O₃ altamente reactivo y una relación de Si/Al por debajo de 2.0 se desarrollan mejor bajo la activación alcalina. (Valenzuela Herrera, 2013)(Xie & Xi, 2001)

El resultado de la reacción de cenizas volantes activado alcalinamente es un material amorfo a semi-cristalino. La activación y el grado de reacción dentro del gel están directamente relacionados con el contenido de material vítreo de las cenizas volantes. (Chen & Brouwers, 2006)

Según el estudio de (Fernández-Jiménez et al., 2005) la clave para un geopolímero basado en cenizas volantes con óptimas propiedades son:

- Menos del 5% del material no quemado
- Menos del 10% de Fe_2O_3
- Un bajo contenido de CaO
- 40%-50% de contenido relativo de sílice
- 80%-90% de partículas con diámetro igual al de menos de $45 \mu m$
- Una alta fase vítrea

A continuación se muestra la aplicación del material de geopolímero para diferentes relaciones atómicas de Si/Al.

Tabla 2: Aplicaciones de los materiales de geopolímeros con diferente relación atómica Si/Al.(Petermann & Saeed, 2012)

Si/Al	APLICACIÓN
1	<ul style="list-style-type: none"> • Ladrillos • Cerámicos • Protección contra incendios
2	<ul style="list-style-type: none"> • Cementos y concretos de bajo CO_2 • Encapsulación de residuos radiactivos
3	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra incendios compuestos de fibra de vidrio. • Equipos de fundición • Compuestos resistentes al calor, $200 \text{ }^\circ C$ a $1000 \text{ }^\circ C$
>3	<ul style="list-style-type: none"> • Selladores industriales, $200 \text{ }^\circ C$ a $600 \text{ }^\circ C$ • Herramientas para aeronáutica SPF aluminio
20-35	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos de fibras resistentes al fuego y al calor.

El contenido de aluminio en las cenizas volantes puede afectar las propiedades de endurecimiento del material en el geopolímero, en presencia de la suspensión de aluminosilicatos alcalinos, se cree que el contenido de aluminio es el detonante químico para el endurecimiento irreversible del cemento. La disolución de las regiones sólidas Al_2O_3 por la solución activadora controla la velocidad, estequiometría, y el alcance de las reacciones en fase de disolución. Por esta razón la composición mineralógica de las puzolanas en bruto es crítica en la formación de materiales geopoliméricos activados en forma alcalina. (Vijaya Rangan, 2010)

Se observaron aumentos en el módulo de young y en la resistencia a la compresión simple hasta un máximo en una relación atómica Si/Al de 1.9 aproximadamente, luego de este valor, los parámetros empiezan a disminuir (Fernández-Jiménez, Monzó, Vicent, Barba, & Palomo, 2008)

Las características globales, óptimas de la solución activadora en las cenizas volantes dependen de la naturaleza de las cenizas, ya que estas ofrecen un equilibrio entre la resistencia mecánica, a la corrosión, flujo y además el costo; Por lo que la solución activadora debe ser optimizada para cada aplicación basándose en los requisitos establecidos.(Montes & Allouche, 2012)

Cuando se desea combinar el geopolímero a base de cenizas volantes con un suelo, el tamaño máximo de partículas debe ser reducido al mínimo antes de la mezcla con las cenizas, aunque es necesario concluir si es una regla general para todos los tipos de suelo. Las concentraciones alcalinas deben tener un cuidado especial, esto debido a que el contenido óptimo de agua necesario para mantener un nivel de concentración aceptable, es menor que el contenido óptimo de agua necesario para la trabajabilidad y la homogeneización adecuada, por esta razón se puede optar por un aditivo superplastificante que reduzca el contenido de agua necesario (Cristelo, Glendinning, Miranda, Oliveira, & Silva, 2012).

Se obtuvieron incrementos en la resistencia del orden de 7.9%, 16.5% y 15.4% para 8 M, 12M y 16 M respectivamente de concentraciones de hidróxido de sodio tras la exposición a una temperatura de 550 °C durante 30 minutos, sin embargo, con una concentración de 18 M de hidróxido de sodio dio como resultado una reducción de la resistencia del orden de 3.5%.(Haneefa, Santhanam, & Parida, 2013)

Se ha observado que cuando existen mayores contenidos de CaO, una buena fase vítrea y pequeños contenidos de cuarzo en las cenizas, pueden influenciar de forma favorable sobre la geopolimerización y el desarrollo de las resistencias mecánicas; Además se observó que a mayores concentraciones de NaOH también se mejora el proceso de geopolimerización y el desarrollo de las fuerzas mecánicas.(Nescu, Georgescu, & Melinescu, 2012)

El uso de una mezcla de NaOH y silicato de sodio con una relación de mezcla 1:1 ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=8$) se utilizó como activador, se obtuvo un resultado de alta resistencia, llegando hasta aproximadamente 47000 kPa de resistencia a la compresión, lo que muestra las altas resistencias que se pueden obtener con solo el uso de cenizas volantes.(Ryu et al., 2013)

La ceniza de fondo también se ha intentado utilizar como una fuente de aluminosilicatos y ha mostrado muy buenas propiedades para la utilización en los geopolímeros, debido a que poseen una alta cantidad de aluminio-silíceo, lo que lo hace un precursor para la activación alcalina; Se utilizó ceniza de fondo y papel calcinado tratado con ácido clorhídrico para remover el carbonato de calcio; Se obtuvieron resistencias a la compresión de hasta 15000 kPa a los 28 días y de 22500 kPa a los 90 días, utilizando hidróxido de sodio y silicato de sodio como activadores.(Antunes Boca Santa, Bernardin, Riella, & Kuhnen, 2013)

2.1.3. ACTIVADORES ALCALINOS

La activación alcalina es un proceso químico donde materiales de aluminosilicatos de origen natural o industrial, pueden transformarse en esqueletos de cemento compactos cuando se mezclan con una solución altamente alcalina. (Duxson et al., 2006)

La selección del activador alcalino es el factor que más impacto tiene en la producción de un geopolímero en las propiedades mecánicas, los activadores inducen a la precipitación y cristalización de las especies silíceas y aluminosas que están presentes en la solución. OH^- actúa como un catalizador para la reacción, y el catión de metal sirve para formar un elemento estructural y equilibrar el marco negativo realizado por el aluminio tetraédrico. (Vijaya Rangan, 2010)

La reacción es realizada por la capacidad de la solución alcalina para disolver el material puzolánico y liberar silicio reactivo y de aluminio en la solución (Petermann & Saeed, 2012).

Los autores (Pacheco-Torgal et al., 2008) presentan la clasificación de los diferentes grupos de agentes activadores, donde M representa un ión alcalino.

- Alcalinos: MOH
- Sales de Ácidos Débiles: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- Silicatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_3$
- Aluminatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{AlO}_3$
- Aluminosilicatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{SO}_3 \cdot (2-6)\text{SiO}_2$
- Sales de Ácido Fuerte: M_2SO_4

Los activadores alcalinos que son más utilizados son una mezcla de hidróxido de sodio o de potasio (NaOH, KOH) y silicato de sodio ($n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) o silicato de potasio ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$). (Kong & Sanjayan, 2008)

Los activadores alcalinos más conocidos son los hidróxidos de sodio y de potasio (NaOH y KOH), donde se han observado altas resistencias mecánicas como resultado de la utilización de KOH en varias concentraciones. Desde un K^+ es más básico, este permite una mayor tasa de ionización polimérica solubilizada y de disolución, dando lugar a una reacción densa de policondensación que proporciona una mayor formación de la red global y un aumento en la resistencia a la compresión de la matriz. En un estudio realizado por (Arjunan, Silsbee, & Roy, 2001) permitió mostrar que el hidróxido de sodio en una concentración baja fue el activador más efectivo para cenizas volantes de bajo calcio. Sin importar el tipo de fuente de aluminosilicatos, a medida que se tiene concentraciones más altas de activadores alcalinos se obtienen mejores propiedades mecánicas en los materiales. (Fernández-Jiménez & Palomo, 2003)

Según el estudio realizado por Khale, Divya, Chaudhary, Rubina el intervalo de pH de 13-14 era el más adecuado para el desarrollo de los geopolímeros para obtener resistencias mecánicas superiores, citado por (Petermann & Saeed, 2012).

El mayor interés de la producción de los geopolímeros es la capacidad de lograr un curado adecuado sin calentamiento externo, los productos de cemento Pórtland común son capaces de alcanzar toda su resistencia a temperatura ambiente, pero no lo pueden lograr en ambientes difíciles como bajas temperaturas. Otro interés en la producción de los geopolímeros es su resistencia a sulfatos (mayor que la del cemento Pórtland), a otras intrusiones químicas y a mantener excelentes capacidades de carga térmica.

Realizar un curado efectivo en campo es una preocupación relevante que limita la utilidad de los geopolímeros como un material de construcción práctico, es necesario realizar el curado del material para obtener las resistencias requeridas y asegurar su correcto funcionamiento.

El estudio realizado por (Hardjito & Rangan, 2005) reveló que los concretos geopoliméricos poseían altas resistencias a la compresión, se someten a muy poca contracción durante el secado y muestran una moderada baja fluencia. El estudio también indicó que poseen una excelente resistencia al ataque de sulfatos, por lo que resulta ser un material de construcción prometedor para ambientes difíciles.

- Hidróxido de Sodio (NaOH)

Se usa comúnmente como un activador alcalino en la producción de geopolímeros, aunque no mantienen el nivel de activación como un ion K^+ , los cationes de sodio son más pequeños que los cationes de potasio y pueden migrar a través de la red de pasta con mucho menos esfuerzo promoviendo una mejor zeolitización. (Vijaya Rangan, 2010)

El hidróxido de sodio ha dado buenos resultados mecánicos en la producción de geopolímeros, dando altas resistencias a la compresión en las muestras ensayadas con este químico, también se ha encontrado que ha reducido la porosidad de estas. (Petermann & Saeed, 2012)

Las concentraciones más altas de NaOH proveen altas resistencias en las primeras etapas de la reacción (Montes & Allouche, 2012), pero la resistencia de los materiales de mayor edad se vio afectada por el exceso de solución OH^- , haciendo la morfología indeseable y con falta de uniformidad en los productos finales. (García-Lodeiro et al., 2007)

Existe una relación directamente proporcional entre las concentraciones de NaOH y el aumento de la temperatura, pero es inversamente proporcional al tiempo en el que se produce la máxima temperatura de hidratación, esto se comprobó en el estudio de Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A., Chindaprasit, P, citado por (Petermann & Saeed, 2012).

Como se habló anteriormente, el factor más relevante para obtener un geopolímero con óptimas propiedades mecánicas es el tipo de activador alcalino, y la concentración que se utilice para este proceso implica un factor crítico para la obtención de altas resistencias a la compresión. (Petermann & Saeed, 2012)

Un aumento en las concentraciones de los activadores alcalinos en las muestras aumenta la velocidad de reacción, el cual conduce a un material final menos poroso y más resistente. Se demostró que la adición del activador y el uso de mayores concentraciones obtenían una porosidad total menor para el uso de cenizas volantes como material puzolánico, lo que aumentó la resistencia temprana de las muestras. (Petermann & Saeed, 2012)

La influencia de la concentración activadora aumenta con el tiempo; Teóricamente la molaridad para las mezclas con cenizas volantes y las escorias granulares de alto horno varían entre el rango de 2 a 10 M, obteniendo valores de resistencias más altas en los valores que se acercan al valor de 10 M. (Song, 2007)

Estudios han mostrado que a mayores concentraciones se tendrá como resultado una mayor resistencia, habiendo siempre un límite óptimo, desde el cual se empezará a ver el efecto contrario. La posible razón de esta disminución se debe a que la mezcla superó su punto de saturación y los iones K^+ sin reaccionar en vez de aumentar la fuerza se convierten en un impedimento para éste. (Petermann & Saeed, 2012)

2.1.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos se puede realizar de forma química, física o ambas sobre un suelo, con el propósito de mejorar sus propiedades.

La ceniza de carbón se obtiene en todo el mundo principalmente por la quema de carbón mineral y carbón bituminoso (Vijaya Rangan, 2010), y están formadas por óxidos ácidos tales como Al_2O_3 , SiO_2 y Fe_2O_3 , los cuales proporcionan la posibilidad de una reacción alcalina (Petermann & Saeed, 2012) (Williams et al., 2002). Estudios previos han alcanzado un CBR máximo de 60% con un contenido de ceniza volante de 20% sin usar ningún activador, aumentando en un 500% el CBR inicial del suelo sin estabilizar (Senol et al., 2006); Otros estudios han demostrado que el contenido óptimo de cenizas volantes es del 20% en suelos arcillosos, pasando de una resistencia a la compresión inicial del suelo de 25 kPa y un CBR de 2.06%, se logró mejorar a una resistencia de 63 kPa y a un CBR de 4.03%, por otro lado las imágenes del microscopio electrónico de barrido ilustraron la formación de nuevos compuestos cementosos, como resultado de la reacción puzolánica que se muestra dentro de los espacios porosos (Sharma, Swain, & Sahoo, 2012).

Las cenizas de carbón tienen la posibilidad de ser activadas en un ambiente altamente alcalino, dando lugar a la formación de un gel que proporciona propiedades cerámicas y zeolíticas que normalmente no están en los materiales de cemento tradicional (Petermann & Saeed, 2012), en un estudio en el cual se utilizó ceniza de carbón como fuente de aluminosilicatos, éste tenía una alta

fracción de óxidos reactivos que reaccionaban significativamente con un activador de silicato de sodio (Na_2SiO_3) que conduce a una alta resistencia (del orden de 60000 kPa) dentro de un corto período de tiempo y bajo temperaturas relativamente bajas (Xie & Xi, 2001); Se logró demostrar que el hidróxido de sodio en una concentración baja (0.8 M) logro ser el activador más efectivo para las cenizas de carbón de bajo calcio con cemento Pórtland (Arjunan et al., 2001), sin importar el tipo de fuente de aluminosilicatos, a medida que se tiene concentraciones más altas de activadores alcalinos se obtienen mejores propiedades mecánicas en los materiales (Fernández-Jiménez & Palomo, 2003).

La distribución de partícula y la finura de las partículas son las características físicas que más afectan la reactividad, mientras que el contenido relativo de sílice afecta más desde el punto de vista químico, la sílice altamente reactiva en las cenizas de carbón aumenta la posibilidad de formación del gel de aluminosilicatos que proporciona la resistencia mecánica a los geopolímeros, los factores que afectan las cenizas de carbón al ser activadas se debe al porcentaje de material inquemado como partículas inertes que causan un aumento en la relación líquido/sólido y el contenido de su fase vítrea (Chen & Brouwers, 2006), los niveles de dosificación recomendados para que las cenizas de carbón sean susceptibles de ser activadas como material cementante son: el porcentaje de carbón inquemado sea inferior al 5%, un contenido de Fe_2O_3 no mayor del 10%, bajo contenido de CaO, contenido de sílice reactiva entre 40-50%, porcentaje de partículas con un tamaño inferior a 45 μm entre 80 y 90% y también un alto contenido de fase vítrea (Fernández-Jiménez & Palomo, 2003).

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. LOS SUELOS

Los suelos son agregados de partículas minerales, y junto con el aire y/o agua en los espacios vacíos, forman sistemas trifásicos. Gran parte de la superficie terrestre está cubierta por los suelos, y son ampliamente utilizados como materiales de construcción. La mecánica de suelos es la rama de la ingeniería que se ocupa de las propiedades de ingeniería de suelos y su comportamiento bajo esfuerzos (Braja M, Das, 2008).

Para tener una comprensión básica de la naturaleza del suelo, se debe conocer la distribución del tamaño de partícula en una masa de suelo. El tamaño de partícula de los suelos en general, varían en un amplio rango, y dependiendo del tamaño de partícula que posean son llamados grava, arena, limo o arcilla (Braja M, Das, 1999). Diversos organismos han tratado de desarrollar los límites de tamaño para estos diferentes tipos de suelo (Braja M, Das, 2008).

La distribución del tamaño de gran grueso, como lo son las gravas y arenas, se determinan mediante análisis granulométrico. (Braja M, Das, 2008)

Las gravas son fragmentos de roca ocasionalmente con partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales; las arenas están formadas principalmente de cuarzo y feldespatos, aunque también están

presentes, a veces, otros granos minerales; los limos son fracciones microscópicas de suelo que consisten en granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas que son fragmentos de mineral micáceos; y las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. (Braja M, Das, 1999)

Según la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (ASSHTO), las gravas pueden identificarse por tener un tamaño de partícula mayor a 2 mm, las arenas de 2 mm a 0.06 mm, los limos de 0.06 mm a 0.002 mm y las arcillas menores a 0.002 mm. (Braja M, Das, 1999)(Braja M, Das, 2008)

Otros documentos como el Naval Facilities Engineering Command Headquarters (NAVFAC HQ), clasifica las gravas en dos grupos, los gruesos, los cuales se identificaban como las partículas retenidas entre las mallas $\frac{3}{4}$ " y 3", y los finos los que quedaban retenidos entre las mallas No. 4 y $\frac{3}{4}$ ". Las arenas se clasificaban en tres grupos, los gruesos, los cuales eran las partículas retenidas entre las mallas No. 10 y No. 4; los medio, retenidos entre las mallas No. 40 y No. 10; y los finos, retenidos entre la malla No. 200 y No. 40. Y los limos y arcillas eran todas las partículas que pasaban la malla No. 200. (Navy, 1982)

Las partículas de arcilla se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no contienen necesariamente minerales arcillosos, las arcillas se definen como "aquellas partículas que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua". (R.E, 1953) (Braja M, Das, 2008) (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

En suma, es apropiado para las partículas de suelo menores a 0.002 mm ser llamadas partículas tamaño arcilla en vez de arcillas. (Braja M, Das, 2008)(Braja M, Das, 1999)

Los minerales de arcilla son silicatos complejos de aluminio, magnesio y hierro, y están formados de dos unidades básicas, un tetraedro de oxígeno de silicio y un octaedro de aluminio o magnesio. Algunos minerales de arcilla consisten en la repetición de capas de laminas de dos hojas, una hoja de dos capas es una combinación de una lámina de sílice con una hoja de gibbsita, o una combinación de una lámina de sílice con una hoja de brucita. (Braja M, Das, 2008)

Los minerales de arcilla más comunes con hojas de tres capas son illita y montmorillonita; una hoja de tres capas consiste en una capa octaédrica en el medio con una hoja de sílice en la parte superior y uno en la parte inferior. Las capas repetidas de estas hojas forman los minerales de arcilla. Las capas de illita están unidas entre sí por iones de potasio. La montmorillonita tiene una estructura similar a la illita, sin embargo, a diferencia de la illita no hay iones de potasio presentes, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas de tres hojas. (Braja M, Das, 2008)

Algunos cationes en exceso de los iones intercambiables y sus aniones asociados se encuentran presentes en la superficie de las partículas de arcilla seca, y cuando se añade agua a la arcilla, estos cationes y aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla; en este punto, las moléculas de agua son dipolares, desde que los átomos de hidrógeno no están simétricamente dispuestos alrededor de los átomos de oxígeno. Existen tres mecanismos generales por los que las moléculas de agua

dipolares, o dipolos, pueden ser atraídos eléctricamente hacia la superficie de las partículas de arcilla: (Braja M, Das, 2008)

- Atracción entre las caras con carga negativa de las partículas de arcilla y los extremos positivos de dipolos
- La atracción entre los cationes en la doble capa y los extremos con carga negativa de dipolos. Los cationes son a su vez atraídos por las caras con carga negativa de las partículas de arcilla
- Intercambio de los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno entre los átomos de oxígeno en las partículas de arcilla y los átomos de oxígeno en las moléculas de agua

2.2.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Medir las propiedades fundamentales de un suelo, como la permeabilidad, la compresibilidad y la resistencia, puede ser difícil, costoso y requerir mucho tiempo.

En proyectos de pavimentos, no se dispone de expresiones racionales para analizar la solución numéricamente; por estas razones, puede ser útil dividir los suelos en grupos con comportamiento semejante, a esto se le llama clasificación de suelos. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

La clasificación de suelos, consiste en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación, suele ser un suceso empírico puesto a punto a través de una experiencia considerable. La clasificación de suelos sirve de guía para preparar el programa de experimentación, si la dificultad del problema requiere una investigación más profunda. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

Las mayoría de clasificación de suelos utilizan pruebas de tipo indicativo, para obtener las características de suelo necesaria y de esta forma asignarle un determinado grupo. Adicionalmente una clasificación de suelos pierde su valor si las pruebas de partida resultan más complicadas que las necesarias para medir directamente la propiedad fundamental que se desea conocer. Los métodos más utilizados para la clasificación son la granulometría y la plasticidad. (William Lambe & V. Whitman, 1991)

A continuación se indican los parámetros a medir en el suelo para realizar su clasificación.

- Densidad de Sólidos (G_s)

La densidad de sólidos se determina exactamente en el laboratorio; la mayoría de los minerales tiene una densidad de sólidos que caen dentro de un rango general de 2.6 a 2.9. (Braja M, Das, 1999)

La densidad de sólidos de arena ligeramente coloreada, formada principalmente de cuarzo, se estima aproximadamente igual a 2.65, para suelos arcillosos y limosos, varía entre 2.6 y 2.9. (Braja M, Das, 1999)

- Redondez, textura superficial y color

El grado de redondez hace referencia a la agueza de los bordes y cantos de una partícula. Para describir la textura se utilizan términos como pulimentada, lisa, rugosa, estriada, mate, entre otros. El color se utiliza con frecuencia para describir un conjunto de partículas, pero deben utilizarse con cuidado ya que el color de una masa de suelo puede variar con la humedad o con la composición química. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

- Análisis mecánico del suelo

El significado del tamaño de una partícula de suelo depende, de la dimensión medida y de la forma de medición. Métodos habituales para la determinación del tamaño de las partículas de un suelo, son el análisis granulométrico por tamizado para partículas gruesas y análisis hidrométrico o por sedimentación para las partículas más pequeñas. (William Lambe & V. Whitman, 1991)

Es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso (o masa) seco total. Se suelen utilizar dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de partícula del suelo; análisis con cribado, para tamaños de partícula mayores de 0.075 mm de diámetro, y análisis hidrométrico para tamaños de partículas menores de 0.075 mm de diámetro. (Braja M, Das, 1999) (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

- Análisis por Cribado

Consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas. (Braja M, Das, 1999)

Inicialmente el suelo se seca al horno, y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas antes de ser pasados por las mallas, luego son colocadas en un vibrador de mallas usado para llevar a cabo la prueba en el laboratorio. Después de que el periodo de vibración concluye, se determina la masa del suelo retenido en cada malla. (Braja M, Das, 1999)

Al suelo que tiene una distribución de tamaños de grano que se extiende sobre un rango bastante grande se le llama suelo bien gradado, en caso contrario, se le llama mal gradado. (Braja M, Das, 2008)

Cuando se tienen suelos cohesivos, es difícil disgregar los grumos en partículas individuales, para este caso, el suelo se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recolectan por separado y se secan en horno antes de que la masa retenida en cada malla sea determinada. (Braja M, Das, 1999)

Los resultados se suelen expresar generalmente como porcentaje de peso total de suelo que ha pasado por las diferentes mallas. (Braja M, Das, 1999)

- Análisis Hidrométrico

Se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua, cuando un espécimen se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes. (Braja M, Das, 1999)

El ensayo del hidrómetro se conduce en un cilindro de sedimentación con 50 g de muestra seca al horno. El cilindro de sedimentación tiene 457 mm de altura y 63.5 mm de diámetro; el cilindro está marcado para un volumen de 1000 ml. Como agente dispersor se usa generalmente el hexametáfosfato de sodio. El volumen de la suspensión de suelo se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada. (Braja M, Das, 1999)

El análisis por hidrómetro es efectivo para separar las fracciones de suelo hasta un tamaño de aproximadamente 0.5 μm . (Braja M, Das, 1999)

- Consistencia del suelo

Los minerales de arcilla existentes en un suelo de grano fino, pueden ser remodelados en presencia de alguna humedad sin desmoronarse; esta naturaleza cohesiva es debida al agua absorbida que rodea a las partículas de arcilla (Braja M, Das, 1999). Si se seca una pasta de arcilla, el contenido de humedad disminuirá gradualmente, y la suspensión pasará de un estado líquido a un estado plástico. (Braja M, Das, 2008)

A inicios del año 1900, el científico sueco Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajos contenidos de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por lo tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólidos, semisólidos, plástico y líquido. (Braja M, Das, 1999) (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. A estos límites se les conoce también como límites de Atterberg. (Braja M, Das, 1999) (Braja M, Das, 2008) (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

Debido al gran aumento de la superficie por unidad de peso al disminuir el tamaño de las partículas, puede esperarse que la cantidad de agua absorbida venga muy influenciada por la cantidad de arcilla presente en el suelo. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

- Límite Líquido (LL)

El LL se define como el contenido de humedad en porcentaje, en el cual el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico.(Braja M, Das, 2008)

Se puede determinar por medio de un dispositivo llamado Casagrande (Braja M, Das, 2008), el cual consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del LL se coloca una pasta en la copa, se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar. Luego, con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido para cerrar una distancia de 12.7 mm a lo largo del fondo de la ranura a los 25 golpes se define como el LL. (Braja M, Das, 1999)(Braja M, Das, 2008)

Lograr ajustar el contenido de humedad en el suelo para satisfacer el cierre de 12.7 mm requerido a los 25 golpes es difícil, por lo que se opta por realizar al menos tres pruebas para el mismo suelo con diferentes contenidos de humedad, con un número de golpes N necesario para lograr el cierre, el cual varía entre 15 y 35% (Braja M, Das, 2008). Con el contenido de humedad del suelo en porcentaje y el número correspondiente de golpes se puede realizar una gráfica de la relación entre el contenido de humedad y el logaritmo en base 10 de N, el cual es aproximadamente una línea recta. Esta línea se conoce como la curva de flujo, y el contenido de humedad correspondiente a $N=25$, determinado a partir de la curva de flujo, da el LL del suelo.

- Límite Plástico (LP)

El LP se define como el contenido de humedad en porcentaje, en el que un suelo en estado plástico cambia a un estado semisólido y de un semisólido a un estado sólido.(Braja M, Das, 2008)

El LP es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. El procedimiento se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal, donde el LP es la humedad con la cual el suelo se desmorona a un diámetro de 3.2 mm. (Braja M, Das, 1999)

- Índice de Plasticidad (IP)

El IP indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica (William Lambe & V. Whitman, 1991), se calcula como la diferencia entre el LL y el LP. (Braja M, Das, 1999)

- Carta de Plasticidad

Los LL y LP son determinados por ensayos de laboratorio, los cuales proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos, de tal manera que se puedan correlacionar varios parametros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo. (Braja M, Das, 1999)

El autor cita a Casagrande (1932), el cual estudió la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales; con base a los resultados que obtuvo, propuso una carta de plasticidad la cual mediante una línea graficada por la ecuación empírica $PI = 0.73(LL - 20)$, se separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los IP contra los LL para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea y los limos inorgánicos se encuentran debajo de la línea. (Braja M, Das, 1999)

2.2.3. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Los suelos que poseen propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas que más comunmente son usados para la clasificación de los suelos son el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. (Braja M, Das, 1999)

Se debe tener en cuenta que el comportamiento de un suelo granular puede relacionarse frecuentemente con la distribución granulométrica, pero el comportamiento de un suelo cohesivo suele depender mucho más de la historia geológica y de su estructura que del tamaño de partículas. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

El Sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos estatales y los condados, y los ingenieros geotécnicos prefieren utilizar el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. (Braja M, Das, 1999)

- Sistema de Clasificación AASHTO

Fue desarrollado en 1929 como el Public Road Administration Classification System (Sistema de Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos). De acuerdo a este sistema de clasificación, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7, donde los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares y el 35% o menos de las partículas pasan por la malla No. 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla No. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios: (Braja M, Das, 1999)

Tamaño de grano (Braja M, Das, 1999):

Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla No. 10 (2mm) de Estados Unidos

Arena: fracción que pasa la malla No. 10 (2mm) U.S y es retenida en la malla No 200 (0.075 mm) U.S.

Limo y arcilla: fracción que pasa la malla No. 200 U.S.

La precisión de las curvas granulométricas de suelos finos es más discutible que la de las curvas correspondientes a suelos gruesos; los tratamientos químicos y mecánicos que reciben los suelos naturales antes de realizar un análisis granulométrico suelen dar lugar a unos tamaños efectivos que son muy diferentes de los existentes en el suelo natural. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

Plasticidad (Braja M, Das, 1999):

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un IP de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un IP de 11 o mayor.

Si cantos rodados y boleos (tamaños mayores que 75 mm) están presentes, éstos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo, el porcentaje de tal material se registra. (Braja M, Das, 1999)

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

La forma original de este sistema fue propuesta por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día, este método es aun utilizado por los ingenieros; el método clasifica los suelos en dos amplias categorías: (Braja M, Das, 1999)

Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso. (Braja M, Das, 1999)

Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El simbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos. (Braja M, Das, 1999)

Otros símbolos también utilizados son: W bien graduado, P mal graduado, L baja plasticidad ($LL < 50$) y H alta plasticidad ($LL > 50$). (Braja M, Das, 1999)

Para realizar una clasificación apropiada con este sistema, se debe conocer la siguiente información: (Braja M, Das, 1999)

Porcentaje de grava: la fracción que pasa la malla 76.2 mm y es retenida en la malla No 4 (abertura de 4.75 mm)

Porcentaje de arena: la fracción que pasa la malla No. 4 (Abertura de 4.75 mm) y es retenida en la malla No. 200 (abertura de 0.075)

Porcentaje de limo y arcilla: la fracción de finos que pasan la malla No. 200 (abertura de 0.075 mm)

Coefficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de curvatura (C_z)

LL e IP de la porción de suelo que pasa la malla No. 40.

Las gravas de grano grueso utilizan los simbolos: GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GC, GP-GM Y GP,GC. Para los suelos de grano fino se utilizan los simbolos: CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML Y Pt. (Braja M, Das, 1999)(Braja M, Das, 2008)(Navy, 1982)

2.2.4. COMPACTACIÓN DE SUELOS

Para la construcción de terraplenes en carreteras, y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos que se encuentran sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. Además, la compactación también disminuye la cantidad de asentamientos indeseables en las estructuras e incrementa la estabilidad de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación del suelo. Los rodillos vibratorios se usan principalmente en el campo para la densificación de los suelos granulares. (Braja M, Das, 1999)

Mediante métodos especiales pueden obtenerse compacidades superiores a la denominada compacidad máxima, y compacidades inferiores a la mínima pueden también obtenerse, en especial en arenas muy finas y limos, sedimentando lentamente el suelo en agua o esponjando el suelo en presencia de una ligera humedad. Cuanto menor es la gama de tamaños de las partículas presentes y cuanto más pequeñas y angulosas son las partículas, menor es la compacidad mínima; mientras que a mayor es la gama de tamaños presente, mayor será la compacidad máxima, esto debido a que los huecos entre las partículas más gruesas pueden rellenarse con las más pequeñas. (T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1991)

A la compactación se le puede decir que es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere algún tipo de energía mecánica. El grado de compactación de suelo se mide en términos de su peso específico seco; cuando se egraga agua a suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua, pero luego de cierto contenido de agua, cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. (Braja M, Das, 1999)

El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo. El ensayo de laboratorio usado generalmente para obtener el peso específico seco máximo de compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba de Proctor de compactación. (Braja M, Das, 1999)

- Prueba Proctor Estándar

En este ensayo, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm^3 . El diámetro del molde es de 101.6 mm. Durante la prueba de laboratorio, el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pistón que transmite 25 golpes a cada capa. El pistón pesa 24.4 N y tiene una altura de caída de 304.8 mm. (Braja M, Das, 1999)

Los valores de densidad seca determinados se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo. (Braja M, Das, 1999)

Para un contenido de agua dado, el peso específico seco máximo teórico se obtiene cuando no existe aire en los espacios vacíos, es decir, cuando el grado de saturación es igual a 100%. (Braja M, Das, 1999)

El tipo de suelo, dependiendo de su distribución granulométrica, la forma de los granos del suelo, la densidad de sólidos del suelo y la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes, tiene una gran influencia en el peso específico seco máximo y en el contenido de agua óptimo. (Braja M, Das, 1999)

Experimentos han mostrado que para arenas, el peso específico seco tiene una tendencia general a decrecer primero, conforme el contenido de agua crece, y luego a incrementarse a un valor máximo con aumentos de agua. El decremento inicial del peso específico seco con un incremento del contenido de agua se atribuye al efecto de la tensión capilar. A bajos contenidos de agua, la tensión capilar en los poros inhibe la tendencia de las partículas de suelo a moverse alrededor y ser compactadas densamente. (Braja M, Das, 1999)

- Prueba Proctor Modificada

Este ensayo se desarrolló debido al uso de nuevos rodillos pesados y a su uso en la compactación de campo, por lo que la prueba de Proctor Estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. (Braja M, Das, 1999)

Para llevar a cabo este ensayo se usa el mismo molde, con un volumen de 943.3 cm^3 , como en el caso de la prueba Proctor Estándar, sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un

pisón que pesa 44.5 N. La caída del martillo es de 457.2 mm. El número de golpes de martillo por cada capa es de 25 como en el caso del ensayo Proctor Estándar. (Braja M, Das, 1999)

Debido a que se incrementa el esfuerzo de compactación con este ensayo, el peso específico seco máximo del suelo también incrementa, este a su vez, es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo. (Braja M, Das, 1999)

El volumen del molde de 943.3 cm³ y los 25 golpes/capa, son generalmente las adoptadas para los suelos de grano fino que pasan la malla No. 4, aunque, bajo cada designación de prueba, se han sugerido tres métodos que reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de partícula en un suelo. (Braja M, Das, 1999)

- Estructura del Suelo Compactado

(Braja M, Das, 1999) cita a Lambe (1958), el cual estudió el efecto de la compactación en la estructura de los suelos arcillosos; los resultados mostraron que la arcilla que es compactada con un contenido de agua más seco del óptimo, adquiere una estructura floclenta, debido a que con un contenido de agua bajo, las capas dobles difusas de iones que rodean a las partículas de arcilla no están totalmente desarrolladas; por lo tanto, la repulsión entre partículas de arcilla se reduce, donde la mayor repulsión conduce a una orientación más azar de las partículas y a un peso específico seco más bajo.

Cuando el contenido de agua de compactación se incrementa hasta llegar a la densidad seca máxima, las capas dobles difusas alrededor de las partículas se expanden, incrementando así la repulsión entre las partículas de arcilla y dando un menor grado de floclación y un peso específico seco más alto. (Braja M, Das, 1999)

Un mayor incremento del agua, expande más aún las capas dobles, lo que resulta en un incremento continuado de la repulsión entre las partículas y una más o menos estructura dispersa, sin embargo, el peso específico seco disminuye porque el agua añadida diluye la concentración de los sólidos del suelo por volumen unitario. (Braja M, Das, 1999)

Para un contenido de agua dado, un esfuerzo de compactación mayor tiende a dar una orientación más paralela a las partículas de arcilla, generándose así una estructura más dispersa. Las partículas quedan más cercanas entre sí y el suelo adquiere un peso específico de compactación mayor. (Braja M, Das, 1999)

En suma, la compactación del lado seco del óptimo produce una estructura floclada que típicamente da mayor resistencia, rigidez, fragilidad y permeabilidad, mientras que la compactación del lado húmedo del óptimo produce una estructura dispersa que típicamente da menor resistencia, rigidez, fragilidad y permeabilidad pero más ductilidad. Por lo tanto, la compactación del lado seco del óptimo es usualmente más apropiada para la construcción de cimentaciones, mientras que la compactación del lado húmedo es más apropiada para la

construcción de capas impermeabilizantes como barreras contra la infiltración. (Braja M, Das, 1999)

- Compactación en Campo

Para la compactación en campo se utilizan usualmente con compactadores de rodillo, los cuales pueden ser: (Braja M, Das, 1999)

- Compactador de rodillos de rueda lisa (o rodillos de tambor liso)
- Compactador de neumáticos de hule
- Compactador con rodillos de pata de cabra
- Compactador de rodillos vibratorios

Los compactadores de rodillos lisos son apropiados para las subrasantes y para la operación final de rellenos con suelos arenosos y arcillosos. Éstos compactadores cubren el 100% bajo las ruedas con presiones de contacto con el suelo de 310 hasta 380 kN/m², y no son apropiados para producir altos pesos específicos de compactación al usarse en capas gruesas. (Braja M, Das, 1999)

Los compactadores con neumáticos de hule tienen varias hileras de neumáticos, que van colocados cerca uno de otro, cuatro a seis en una hilera; la presión de contacto bajo los neumáticos varía entre 600 y 700 kN/m² y su cobertura es aproximadamente de 70% a 80%; estos rodillos se utilizan usualmente para la compactación de suelos arenosos y arcillosos. (Braja M, Das, 1999)

Los rodillos pata de cabra son tambores con un gran número de protuberancias; el área de cada una de esas protuberancias puede variar entre 25 y 85 cm². La presión de contacto bajo las protuberancias varía entre 1380 y 6900 kN/m² +; los rodillos pata de cabra suelen usarse para la compactación de suelos arcillosos por su mayor efectividad. (Braja M, Das, 1999)

Los rodillos vibratorios son muy eficientes para la compactación de suelos granulares; los vibradores pueden ser unidos a los rodillos lisos, a los de neumáticos o a los rodillos pata de cabra para suministrar efectos vibratorios al suelo. (Braja M, Das, 1999)

También existen placas vibratorias manuales, éstas se usan para una compactación efectiva de los suelos granulares sobre un área limitada. (Braja M, Das, 1999)

Para lograr el peso específico deseado por compactación en campo, existen otros factores adicionales a la compactación como lo es: el espesor de las capas, la intensidad de la presión aplicada por el equipo compactador, y el área sobre la cual se aplica la presión que es aplicada en la superficie, que decrece con la profundidad, resultando en una disminución del grado de compactación del suelo. (Braja M, Das, 1999)

El número de pasadas del rodillo también afecta el peso específico seco del suelo durante la compactación. El peso específico seco de un suelo a un contenido de agua dado crecerá hasta cierto

punto con el número de pasadas del rodillo, donde más allá de este punto permanece aproximadamente constante. Para la mayoría de los casos, para lograr el máximo peso específico con el rodillo es necesario realizar de 10 a 15 pasadas. (Braja M, Das, 1999)

- Especificaciones

Para las especificaciones de construcción en campo, se le suele exigir al contratista lograr un peso específico seco por compactación en campo del 90% al 95% del peso específico seco máximo determinado en laboratorio ya sea por la prueba Proctor estándar o modificado. Se espera que el contratista logre un peso específico seco mínimo independientemente del procedimiento de campo que utilice. (Braja M, Das, 1999)

- Determinación del peso específico de campo después de la compactación

En campo es conveniente conocer si el peso volumétrico especificado se está logrando o no. Se pueden utilizar tres procedimientos estándar para determinar el peso específico de campo de compactación: (Braja M, Das, 1999)

- Método del cono de arena
- Método del globo de hule
- Método nuclear

El método del cono de arena se puede seguir utilizando la norma D-1556 de la ASTM, éste consta de un recipiente de vidrio o plástico con un cono de metal unido a su parte superior. El recipiente se llena con arena Ottawa seca muy uniforme, se determina el peso del envase, del cono y de la arena que llena el recipiente. En campo se excava un pequeño agujero en el área donde el suelo fue compactado, el cono con el recipiente unido a él se invierte y se coloca sobre el agujero, se permite que la arena fluya del envase al agujero y al cono; una vez que el agujero y el cono están llenos, se determina el peso del recipiente, del cono y de la arena restante en el envase. Luego se puede determinar el peso específico seco de la compactación hecha en campo como la relación entre el peso seco del suelo excavado del agujero y el volumen del agujero. (Das, 1999)

El método del globo de hule se puede seguir utilizando la norma D-2167 de la ASTM, éste ensayo es similar al método del cono de arena; para el ensayo se hace un agujero de prueba y se determinan el peso húmedo del suelo retirado del agujero y su contenido de agua, el volumen del agujero se determina introduciendo a éste un globo de hule lleno con agua de un recipiente calibrado, del cual el volumen se lee directamente. El peso específico se determina igual que el método del cono de arena. (Das, 1999)

El método nuclear consta de un densímetro nuclear que opera en agujeros taladrados o desde la superficie del terreno. El instrumento mide el peso de suelo húmedo por volumen unitario y también el peso del agua presente en un volumen unitario de suelo. El peso específico seco de

suelo compactado se determina restando el peso del agua del peso específico húmedo del suelo. (Das, 1999)

2.2.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

El ensayo de UCS es un tipo especial de pruebas no consolidada – no drenada, en el que se usa comúnmente para especímenes de arcilla. En este ensayo no hay presión de confinamiento y una carga axial se aplica gradualmente hasta. Teóricamente, el esfuerzo máximo de una arcilla saturada debe ser el mismo que el obtenido a partir del ensayo no consolidado – no drenado para especímenes similares. (Braja M. Das, 1999) (Braja M. Das, 2008)

Los experimentos de compresión simple a veces se efectúan en suelos no saturados. Manteniendo constante la relación de vacíos de un espécimen de suelo, la resistencia a la compresión simple disminuye rápidamente con el grado de saturación. (Braja M. Das, 2001)

En muestras cilíndricas, generalmente la falla ocurre en un plano diagonal donde se produce la mayor parte de la resistencia a la cizalladura. Los materiales blandos pueden no producir planos diagonales de falla definidos, pero en general se supone que ha fallado cuando la deformación axial ha alcanzado un valor de 20%. (Navy, 1982)

Para realizar el ensayo, se centra la probeta en el plato base de la máquina, se coloca la placa superior y se ajusta el conjunto de modo de hacer contacto entre el pistón del equipo y la placa; los lectores de carga y deformación se fijan en cero y se aplica la carga, tomando simultáneamente las lecturas de deformación, tiempo y carga, hasta que suceda uno de los siguientes casos: la carga aplicada disminuye, la carga aplicada se mantiene constante por 4 lecturas o la deformación sobrepasa el 20% de la deformación unitaria previamente calculada. (Universidad Católica de Valparaíso, 2014)

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El programa experimental se describe en las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica de las cenizas de carbón usadas como cementantes o filler en materiales de construcción, principalmente en suelos.
2. Caracterización de los materiales objeto de estudio: de arcilla, arenilla, suelo de urrao y ceniza de carbón.
3. Diseño de experimentos, elaborado a partir de lo obtenido por la etapa de caracterización para realizar las mezclas.
4. Ejecución experimental, en la cual se elaboraban las probetas y posteriormente se evaluaban las propiedades mecánicas de éstas.

Para obtener las clasificaciones de los materiales y la cantidad de los mismos, se utilizaron los siguientes equipos y procedimientos en el laboratorio.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE CARBÓN

Para la ceniza de carbón se realizaron ensayos físicos, químicos y mineralógicos, descritos en la Tabla 2.

Tabla 2: Ensayos de caracterización – Ceniza de carbón

Físicas	Químicas	Mineralógicas
Tamaño de partícula pasante malla 200 ^{*+^}	Composición Química de Óxidos ^{+^}	Fases Cristalinas ^{+^}
Distribución tamaño de partícula ^{*+^}	Carbón Inquemado ^{+^}	Morfología ^{+^}
Peso específico ^{*+^}		
Color, aspecto, forma ^{*+^}		

3.1.1. ENSAYOS FÍSICOS

Tamaño de partícula pasante malla 200: Se realizó con los tamices 325 y 400 de la serie Tyler, tomando una muestra de 5 g para cada uno, luego haciendo uso de agua se hizo pasar la muestra por el tamiz y dejando al horno el material retenido se hallaba la cantidad de material que pasa.

Distribución tamaño de partícula: Para este ensayo se utilizó una serie de tamices de la serie Tyler siguiendo la normativa para suelos descrita en la Norma INV E-123-13.

Difracción de Rayos X (DRX): El ensayo se realizó con Difractómetro de Rayos X marca PANalytical empyrean modelo 2012 en corridas de 7° a 80° en 2θ.

Color, aspecto, forma: Se realizó una descripción visual de estos factores.

3.1.2. ENSAYOS QUÍMICOS

Composición Química de Óxidos: Se realizó con el equipo de Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X marca THERMO modelo: OPTIM`X. (FRX) con pastillas de KBr.

Carbón Inquemado: Se identificó como las pérdidas por calcinación en la prueba FRX.

3.1.3. ENSAYOS MINERALÓGICOS

Fases Cristalinas: Se identificaron por la técnica de DifracciDRX mediante bases de datos del software Panalytical X'pert High Score

Morfología: Esta se obtiene a través del Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV (SEM, por sus siglas en inglés “Scanning Electron Microscope”)

3.2. ACTIVADOR ALCALINO

Se utilizó como activador alcalino Hidróxido de Sodio (NaOH) sólido y en escamas de grado comercial, con un 98% de pureza; Para la solución activadora se utilizó una molaridad de 3.5, debido a que esta concentración comercial es equivalente al utilizarse cemento al 7% en muestras de suelo cemento, siendo esta última una dosificación en la que se tienen resultados satisfactorios.

Para preparar la solución activadora se vierten en agua los gramos necesarios de Na(OH) en escamas para lograr 3.5M, posteriormente se deja reposando cerca de 5 minutos y se vierte en las mezclas.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

3.3.1. ARCILLA Y URRAO

Con el fin de conocer las características que poseían estos materiales, se realizaron ensayos de límites de consistencia siguiendo la norma INV E - 125 Y INV E - 126, granulometría siguiendo la norma INV E - 123, para gravedad específica siguiendo la norma INV E 128, y cantidad de material orgánico se realizó con el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

3.3.2. ARENILLA

Los ensayos realizados a los suelos arcilla y urrao, fueron aplicados a la arenilla, excepto el ensayo de granulometría por hidrómetro y límites de consistencia.

3.4. ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO

Se realizaron ensayos de Proctor modificado a los suelos de arenilla, arcilla y urrao; adicionalmente cada suelo se mezcló con CC pasante malla N°4 en dosificaciones de 7%, 14% y 21% en peso seco del material. Para cada uno de los ensayos Proctor se usaron 4 humedades diferentes para obtener las curvas de humedad óptima vs densidad máxima en cada tipo de dosificación.

Todos los ensayos fueron realizados siguiendo la norma INV E – 142.

Foto 1: Ensayo Proctor Modificado
Fuente: propia



4.2. PROBETAS DE ENSAYO

Las muestras de suelo – CC fueron mezcladas en seco, luego se añadía la cantidad de solución activadora necesaria para lograr la humedad óptima que fue identificada mediante el ensayo Proctor modificado, posteriormente las mezclas se introducen en bolsas con sellado hermetico durante 24 horas para asegurar la total humectación de todas las partículas, finalmente se procede a la compactación en los moldes, ver Foto 2.

Las probetas de ensayo fueron elaboradas en moldes cilindricos de aleación de bronce con un diámetro de 5 cm y una altura de 10 cm como se observa en la Foto 3, compactadas y extraídas en un marco de reacción con la ayuda de un gato hidráulico, ver Foto 4.

Identificada la densidad máxima, se incorpora en el molde la cantidad de masa necesaria para que en el momento de compactación se logren valores de densidad equivalentes al hallado mediante Proctor modificado para cada una de las mezclas.

Foto 2: Probetas de Ensayo
Fuente: propia



Foto 3: Molde Cilíndrico de Plomo
Fuente: propia



Foto 4: Marco de Reacción y Gato Hidráulico
Fuente: propia



Para tener confianza de los resultados obtenidos, se realizaron 3 probetas por cada tipo de mezcla y adicionalmente se realizo una replica.

4.3. MÉTODOS DE CURADO

Se realizaron 4 diferentes métodos de curado, ver Tabla 3, con el fin de evaluar la influencia de la temperatura y la humedad en la resistencia mecánica de las mezclas de suelo con ceniza.

Tabla 3: Factores Ambientales

Temperatura	Porcentaje de Humedad
20°C - 30°C	Ambiente
40°C - 50°C	Mayor a 95%

4.3.1. CURADO AMBIENTE (20°C – 30°C; AMBIENTE)

Para garantizar una temperatura entre 20°C - 30°C y una humedad ambiente, se curaron las muestras en un cuarto cubierto, libre de humedad, con la temperatura natural de la ciudad de Medellín y una humedad cercana al 67%.

Foto 5: Curado Ambiente
Fuente: propia



4.3.2. CURADO EN HORNO (40°C – 50°C; MAYOR A 95%)

Las probetas fueron ubicadas en un horno a una temperatura de 50°C y colocadas en bolsas con sellado hermetico para garantizar una humedad mayor al 95%.

Foto 6: Curado en Horno
Fuente: propia



4.3.3. CURADO EN BAÑO MARÍA (40°C – 50°C, AMBIENTE)

Para garantizar una alta temperatura a humedad ambiente. las probetas fueron ubicadas en cajones plásticos, y luego se llevaban al baño maría como se muestra en la Foto 7, y colocadas a una temperatura de 55°C para asegurar una temperatura de 45°C dentro de los cajones, la cual fue medida con la ayuda de un termohidrómetro como el que se observa en la Foto 8.

Foto 7: Curado en Baño María
Fuente: propia



Foto 8: Termohidrómetro
Fuente: propia



Debido a la temperatura, se perdía la humedad al interior de los recipientes, con el fin de mantener la humedad se ubicó una esponja húmeda en los recipientes, de esta manera se garantizaba una humedad cercana al 70%.

4.3.4. CURADO EN CUARTO HÚMEDO (20°C – 30°C, MAYOR A 95%)

Se utilizó un cuarto húmedo para garantizar una humedad superior al 95% (según mediciones históricas) y una temperatura entre 20°C – 30°C.

Foto 9: Curado en Cuarto Húmedo

Fuente: propia



4.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

Los ensayos de resistencia se realizaron en el equipo Humboldt – 3000 con una celda de carga de 45 kN y a una velocidad de 1 mm/min según indica la norma INV E – 614. Ver Foto 10

Foto 10: Equipo Humboldt – 3000

Fuente: propia



Solo se registro la resistencia máxima de las muestras y la deformación máxima de falla.

5. RESULTADOS

5.2. CLASIFICACIÓN

5.2.1. CENIZA DE CARBÓN

Para realizar todos los ensayos de este proyecto para la ceniza de carbón utilizada, proveniente de una industria ladrillera, fue tamizado por la malla N°4, éste residuo es denominada CC. Los resultados obtenidos de la clasificación por tamaño de partícula del material se muestran a continuación:

- *Distribución de tamaño de partícula*

En la Tabla 4 se observa que el 20% de las partículas presentan un tamaño de grano superior a 0.3 mm.

Tabla 4: Serie de tamices - CC

Tamiz N°	Abertura de tamiz (mm)	Pasa (%)
4	4.7600	99.87
8	2.3600	99.43
16	1.1800	98.11
30	0.6000	94.30
50	0.3000	81.12
100	0.1490	43.55
200	0.0750	43.55

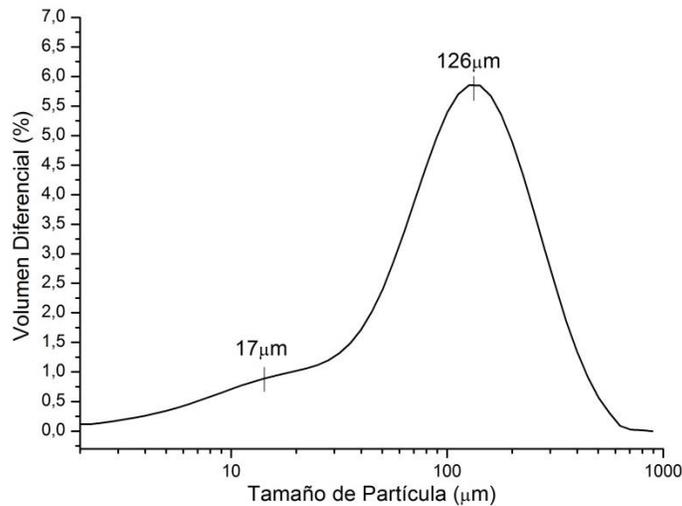
- *Pasante Malla N°200*

En la Tabla 5 se muestran los resultados del porcentaje que pasa los tamices 325 y 400 y en la Gráfica 1 se observan los resultados de la prueba de distribución de tamaño de partícula.

Tabla 5: Tamices N° 325 y 400

Tamiz N°	Abertura de tamiz (mm)	Pasa (%)
325	0.0450	34.80
400	0.0380	31.80

Gráfica 2: Distribución de tamaño de partícula.

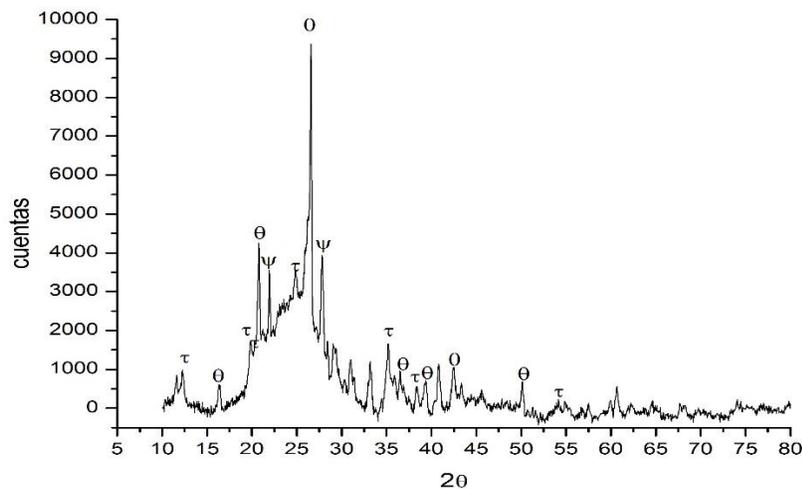


Se observa en la Gráfica 2 que la CC presenta una distribución de tamaño concentrada alrededor de 126 μm y solo una pequeña fracción de partículas concentradas alrededor de 17 μm , lo cuál la cataloga como una ceniza bastante gruesa.

- *Difracción de Rayos X (DRX)*

En la Gráfica 3 se muestra el resultado del ensayo por DRX para la CC.

Gráfica 3: DRX - CC



τ : caolinita ($\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$); Ψ : anortita ($\text{Al}_2\text{CaO}_8\text{Si}_2$); θ : Óxido de Sílice (SiO_2)

El SiO_2 es característico de materiales que presentan propiedades puzolánicas o que tienen potencial para reaccionar con hidróxidos alcalinos y conformar compuestos cementantes.

También se presentan en el difractograma picos asociados a arcilla tipo caolinita, que puede estar asociada a la materia prima para el proceso de fabricación de los ladrillos.

Se observan picos característicos de anorita, asociados a productos de la sinterización de las mezclas para la producción del cerámico.

Se concluye que es una ceniza bastante contaminada ya que es resultado del barrido de la ceniza remanente en los hornos luego de realizada la quema de los ladrillos frescos.

- *Color, aspecto, forma*

En la Foto 11 se muestra la ceniza de carbón como es recibida por el proveedor; Se observa en su mayoría un color negro y algunas partículas de color gris, también posee algunos residuos de ladrillo; posee varios tamaños de partícula redondeados y se pueden observar estructuras porosas en los granos de mayor tamaño.

Foto 11: Ceniza de Carbón sin tratar
Fuente: propia



- *Composición Química de Óxidos*

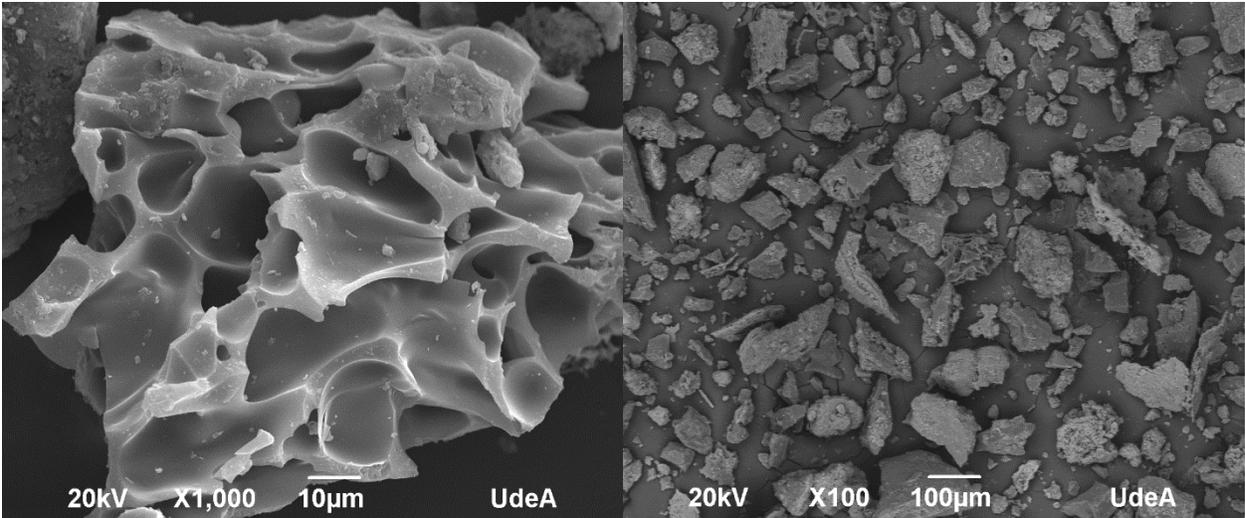
Tabla 6: Composición química de óxidos en porcentaje:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Otros Oxidos	Perdidas por calcinación (950 °C)
21,2	15,61	4,62	3,61	0,752	1,41	1,22	0,557	1,131	49,89

La composición química demostró que la suma de los componentes que podrían tener propiedades puzolánicas (SiO₂-Al₂O₃) son equivalentes al 36.81% en masa de la ceniza, y que un 49.89% corresponde a carbón inquemado. Lo que indica que la eficiencia del proceso no es alta y genera una ceniza muy contaminada y poco activa químicamente. Aunque es positivo el hecho de que la ceniza presente un módulo de SiO₂/Al₂O₃ en masa de 1,35, donde los valores superiores a 1 en éste módulo constituyen productos para la aplicación en cementos de acuerdo a lo establecido en la Tabla 1. (Petermann & Saeed, 2012)

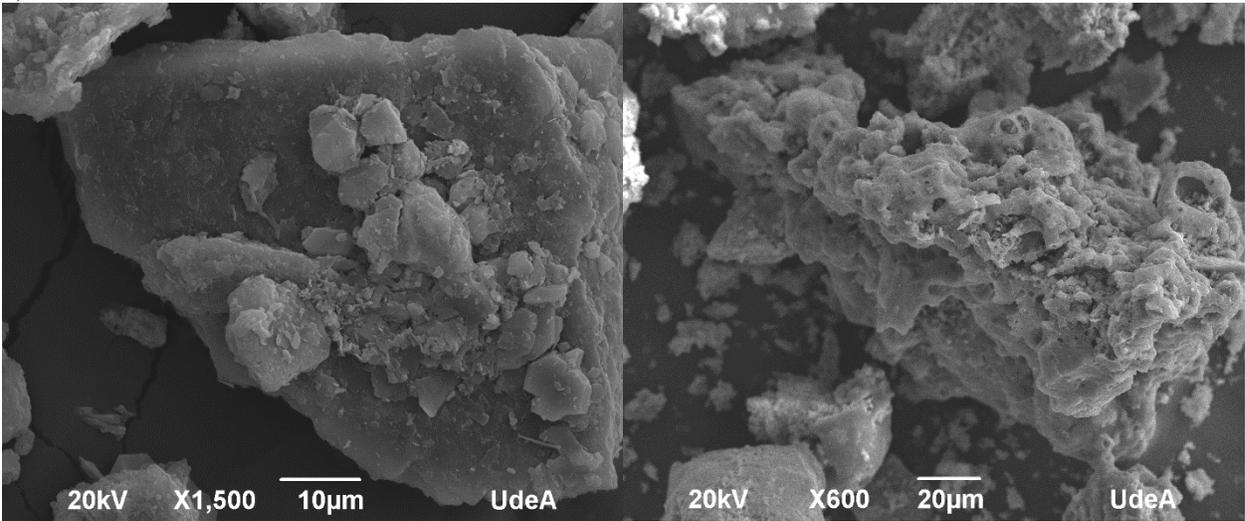
- *Morfología*

La micrografía de SEM demostraron muy baja presencia de partículas esféricas, característica importante en las cenizas de carbón de alta reactividad.



a)

b)



c)

d)

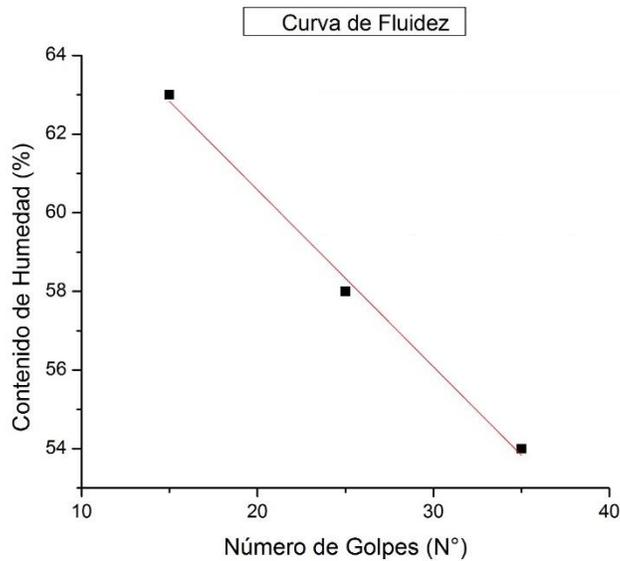
- a) Partícula de alta porosidad correspondiente a carbón inquemado.
- b) Fragmentos de partículas que componen la CC, se observan partículas angulares asociadas a sílice y partículas irregulares con bordes no muy definidos asociadas al carbón inquemado. No se observan esferas, características de las cenizas de carbón (Fly ash o Bottom ash)
- c) Partícula compacta rica en sílice y alúmina
- d) Partícula de carbón inquemado con algunos trozos de esferas de sílice y alumina de 20 µm de diámetro. Éstas se identificaron a través de un análisis químico por EDX realizado con el microscopio electrónico de barrido.

5.2.2. ARCILLA

- *Límites de Consistencia*

En la Gráfica 4 se puede observar curva de fluidez para el cálculo del Límite Líquido (LL).

Gráfica 4: Curva de Fluidez - Arcilla



Límite Líquido (LL) = 57%

Tabla 7: Humedad – Límite Plástico

Humedad (%)		
25.3	25.6	25.4

Límite Plástico (LP) = 25%

La diferencia entre el LL y el LP indicó que el IP:

Índice de Plasticidad (IP): 32%

- *Gravedad Específica*

Para la gravedad específica de la Arcilla, se seleccionaron 3 muestras y dos ensayos de gravedad específica a cada uno de ellos.

Tabla 8: Gravedad Específica

Muestra	Gravedad Específica	Gravedad Específica Promedio	Desviación Estandar
1	2.710	2.692	0.03
	2.675		
2	2.703	2.709	0.01
	2.715		
3	2.720	2.713	0.01
	2.707		

Los ensayos se aceptan cuando el desviación es menor a 0.06, por lo que todos los ensayos fueron positivos.

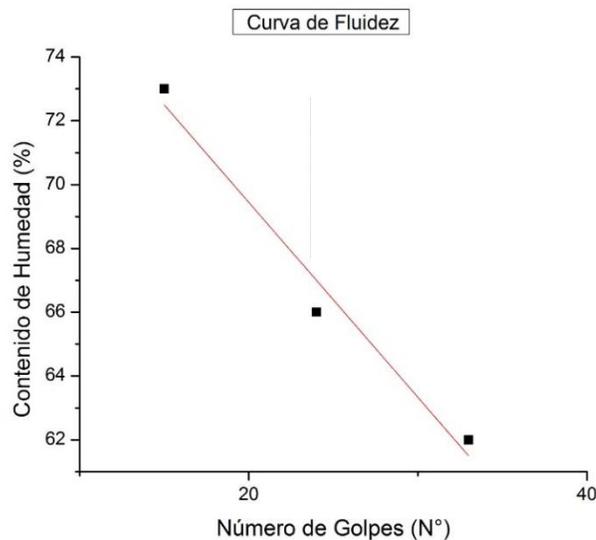
La arcilla se recibió por el proveedor con algunas raíces, pero esta fue retirada con la ayuda del tamizado, por lo que no se detectó ningún contenido de materia orgánica en la muestra.

5.2.3. URRAO

- *Límites de Consistencia*

En la Gráfica 5 se puede observar la curva de fluidez para el cálculo del Límite Líquido (LL).

Gráfica 5: Curva de Fluidez - Urrao



Límite Líquido (LL) = 66%

Para el cálculo del Límite Plástico (LP) para el suelo de Urrao se tiene la siguiente información de humedad.

Tabla 9: Humedad – Límite Plástico

Humedad (%)		
48.4	48.3	48.5

Límite Plástico (LP) = 48%

Índice de Plasticidad (IP): 17%

- *Gravedad Específica (Gs)*

Para la gravedad específica del suelo de Urrao, se seleccionaron 3 muestras y dos ensayos de gravedad específica a cada uno de ellos

Tabla 10: Gravedad Específica Muestra 1

Muestra	Gravedad Específica	Gravedad Específica Promedio	Desviación Estandar
1	2.699	2.710	0.02
	2.710		
2	2.688	2.703	0.03
	2.718		
3	2.709	2.709	0.01
	2.715		

Los ensayos se aceptan cuando el desviación es menor a 0.06, por lo que todos los ensayos fueron positivos.

No se detecto ningun contenido de materia organica en la muestra.

5.2.4. ARENILLA

- *Gravedad Específica (Gs)*

Para la gravedad específica de la Arcilla, se seleccionaron 3 muestras y dos ensayos de gravedad específica a cada uno de ellos.

Tabla 11: Gravedad Específica Muestra 1

Ensayo	Gravedad Específica	Gravedad Específica Promedio	Desviación Estándar
1	2.67	2.69	0.03
	2.71		
2	2.75	2.77	0.03
	2.79		
3	2.74	2.77	0.04
	2.80		

Los ensayos se aceptan cuando el desviación es menor a 0.06, por lo que todos los ensayos fueron positivos.

Se encontro un porcentaje de 0.2% de material organico en la muestra.

5.2.5. GRANULOMETRÍAS

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos al pasar los materiales de Arenilla, Urrao y Arcilla por la serie de tamices; Para los materiales de Urrao y Arcilla se incluye el tamizado por hidrómetro.

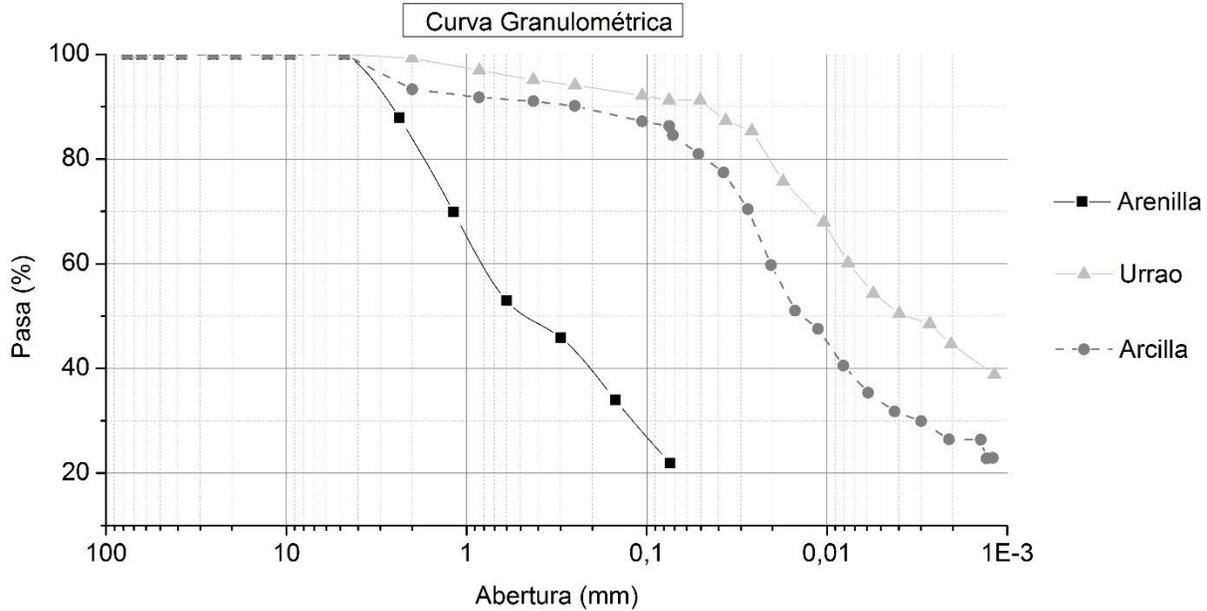
Tabla 12: Material que Pasa

Tamiz (N°)	Urrao		Arcilla	
	Abertura (mm)	Pasa (%)	Abertura (mm)	Pasa (%)
4	4.7600	100.000	4.7600	100.000
10	2.0000	93.330	2.0000	99.290
20	0.8500	91.800	0.8500	96.950
40	0.4250	91.030	0.4250	95.150
60	0.2500	90.120	0.2500	94.080
140	0.1060	87.210	0.1060	92.120
200	0.0750	86.280	0.0750	91.210
Hidrómetro	0.0715	84.528	0.0505	91.207
	0.0515	80.960	0.0364	87.326
	0.0374	77.446	0.0261	85.385
	0.0274	70.374	0.0175	75.683
	0.0204	59.735	0.0104	67.920
	0.0150	51.018	0.0076	60.158
	0.0112	47.557	0.0055	54.336
	0.0081	40.528	0.0040	50.455
	0.0059	35.337	0.0027	48.514
	0.0042	31.758	0.0020	44.633
	0.0030	29.910	0.0012	38.812
	0.0021	26.406		
	0.0014	26.385		
	0.0013	22.764		
0.0012	22.892			

Arenilla		
Tamiz (N°)	Abertura (mm)	Pasa (%)
4	4.76	100.000
8	2.36	87.900
16	1.1800	69.916
30	0.6000	52.941
50	0.3000	45.882
100	0.1490	33.950
200	0.0740	21.849

La curva granulométrica de la Arenilla, Arcilla y el suelo de Urrao se muestran en la Grafica 5, incluyendo el ensayo por hidrómetro.

Gráfica 6: Granulometría Suelos



Una vez que pasan los materiales por la malla N° 4 de la serie Tyler se realizan las granulométrías determinadas en la Gráfica 6.

5.2.6. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES (AASHTO)

En la Tabla 13 se muestra el resumen de los ensayos presentados anteriormente para realizar la clasificación.

Tabla 13: Porcentaje de Material que Pasa

	Arenilla	Arcilla	Urrao
Tamiz de 2 mm N°10	84.00		
Tamiz de 425 µm N°40	50.00		
Tamiz de 75 µm N°200	21.84	91.21	86.28
LL (%)		57	66
IP (%)		32	17
Constituyentes Principales de Tipos Más Comunes	Fragmentos de rocas, grava y arena	Suelo Arcilloso	Suelo Limoso

Según la Tabla 14 y siguiendo la norma AASHTO para la clasificación de suelos, se presenta a continuación en la Tabla # la clasificación a la que pertenece cada tipo de material.

Tabla 14: Clasificación AASHTO de los Materiales

	Arenilla	Arcilla	Urrao
Grupo	A-1b	A-7-6	A-7-5

La Arenilla entra en el grupo A-1b, el cual lo constituye un material esencialmente bien gradado de arena gruesa.

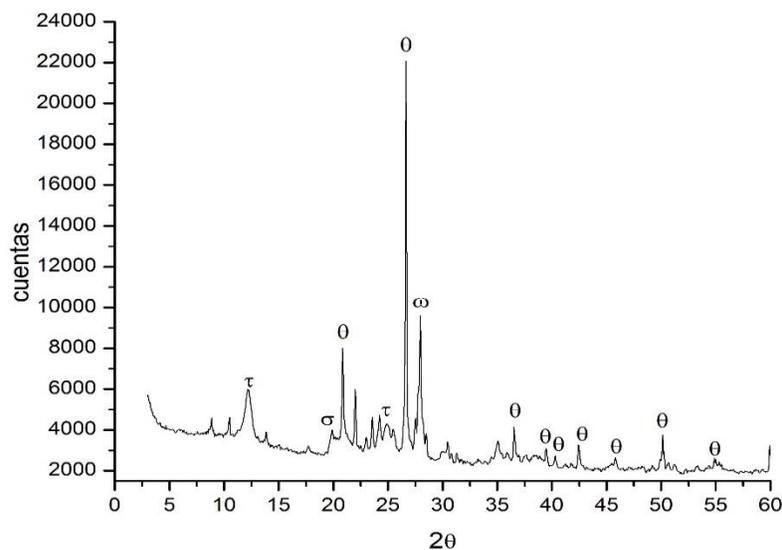
La Arcilla se encuentra en el grupo A-7-6, el cual es un material fino arcilloso plástico, comprende mezclas de suelo arcilloso con arena y grava, suelen presentar importantes cambios volumétricos entre los estados húmedo y seco.

El suelo de Urrao se encuentra dentro del grupo A-7-5, el cual se clasifica como un materia con índices plásticos moderados en relación con el límite líquido, estos suelos son altamente elásticos y son propensos a cambios de volumen considerables; debido a su bajo IP y poseer una textura limosa, este material puede considerarse como una arcilla limosa.

5.2.7. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

En las Tablas 7, 8 y 9 se muestran los resultados de los ensayos de DRX a los suelos de Arcilla, Arenilla y suelo de Urrao.

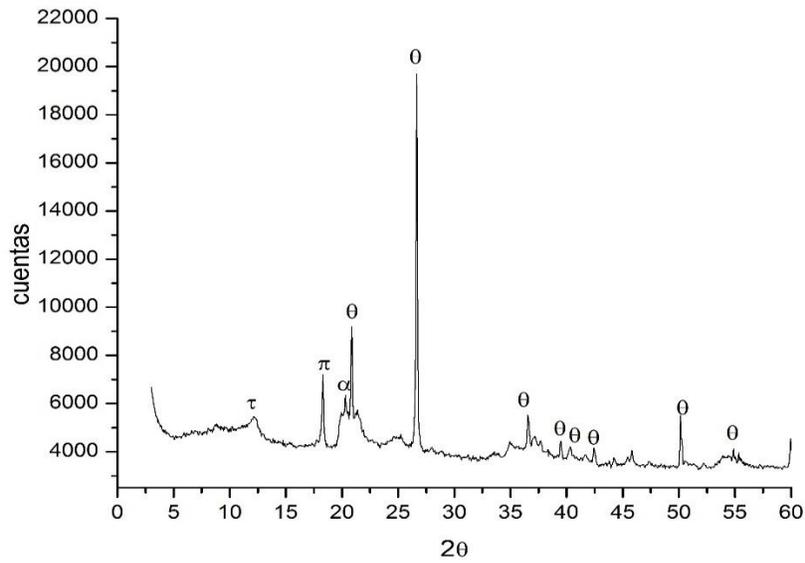
Gráfica 7: DRX - Arcilla



θ : Óxido de Silice (SiO_2); σ : montmorillonita ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$); ω : albita ($\text{Na, Ca} \text{Al} (\text{Si, Al})_3 \text{O}_8$.);
 τ : caolinita – montmorillonita ($\text{A}_{14}\text{H}_{14}\text{Na}_{0.30}\text{O}_{25}\text{Si}_6$)

La montmorillonita es un tipo de filosilicato con capacidad de hinchamiento cuando entra en contacto con el agua, este comportamiento es característico de las arcillas. La caolinita presenta un comportamiento similar pero su naturaleza es menos expansiva. Tanto la sílice como la albita presentes en este tipo de suelo están asociadas a los óxidos de silicio y de aluminio con microestructura cristalina que no presenta propiedades de plasticidad, siendo éstos de gran abundancia en la corteza terrestre, generalmente son componentes mineralógicos que están asociados con arenas.

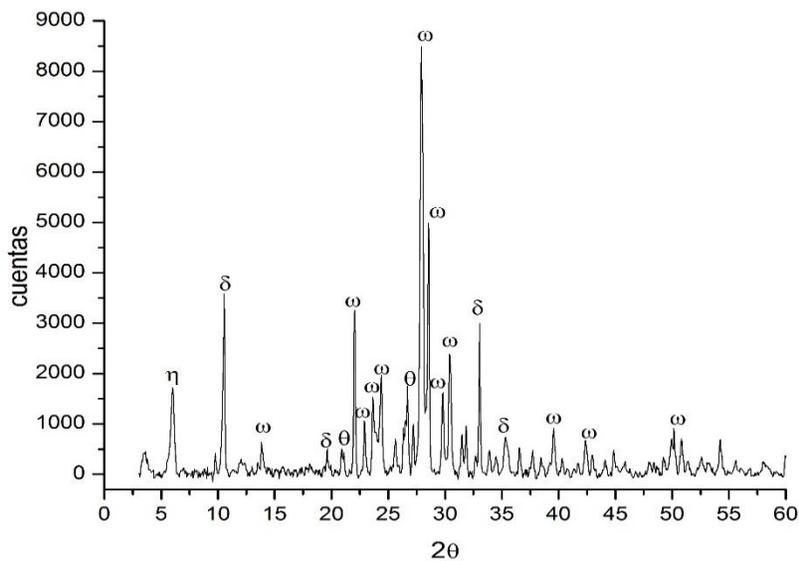
Gráfica 8: DRX – Urrao



θ : Óxido de Silice (SiO_2); α : Óxido de Titanio (O_2Ti); π : gibsita ($Al(OH)_3$)

La gibsita se encuentra presente en los suelos lateríticos, y está asociada a una meteorización del suelo enriquecido en alúmina, ver Tabla 16, donde los productos finales suelen ser de alta concentración de hidróxidos de aluminio. Aunque el difractograma presenta un pico característico de gibsita, este no es tan representativo ya que existen otros picos asociados al óxido de silicio como componente cristalino principal. También se observa la presencia de arcillas tipo caolinita.

Gráfica 9: DRX - Arenilla



θ : Óxido de Silice (SiO_2); ω : albita ($(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$); δ : ϕ Ferroactinolita ($Ca_2Fe_5H_2O_{24}Si_8$); η : Magnesio horblenda ($Mg \cdot Fe$)

El difractograma de la arenilla presentó picos muy definidos, indicando que los materiales que lo componen son de alta cristalinidad, lo que le brinda alta estabilidad fisicoquímica y mecánica a los componentes mineralógicos

5.2.8. Composición Química

En las Tablas 15,16 y 17 se muestra la composición química de la Arcilla, Arenilla y suelo de Urrao.

Tabla 15: Composición Química - Arcilla

OXIDO	SiO2	Fe2O3	K2O	ZrO2	CaO	Cr2O3	NiO	Na2O
%p/p	57.42	9.54	2.31	0.0565	1.73	0.0177	0.0111	0.87
OXIDO	Al2O3	TiO2	V2O5	WO3	MnO	MgO	ZnO	-----
%p/p	26.12	0.873	0.043	0.0441	0.0585	0.896	0.0152	-----

Se observa en la Tabla 15 que los óxidos que predominan son los de silicio, aluminio y hierro, característico en las arcillas montmorillonitas.

Tabla 16: Composición Química - Urrao

OXIDO	SiO2	Fe2O3	K2O	ZrO2	CaO	Cr2O3	CuO	NiO
%p/p	41.53	20.47	0.656	0.0549	0.0478	0.0234	0.0207	0.0173
OXIDO	Al2O3	TiO2	V2O5	WO3	MnO	SnO2	ZnO	-----
%p/p	35.45	1.51	0.0969	0.0498	0.0403	0.0229	0.0175	-----

Para el suelo de Urrao se observa en la Tabla 16 que existe una concentración alta de óxido de aluminio que pueden estar asociadas a la presencia de la gibsita.

Tabla 17: Composición Química - Arenilla

OXIDO	SiO2	Fe2O3	K2O	ZrO2	CaO	Cr2O3	CuO	Na2O	NiO
%p/p	52.11	10.18	0.862	0.0435	8.04	0.032	0.012	2.57	0.0217
OXIDO	Al2O3	TiO2	V2O5	WO3	MnO	MgO	ZnO	P2O5	-----
%p/p	19.26	1.27	0.045	0.0373	0.181	5.09	0.0089	0.228	-----

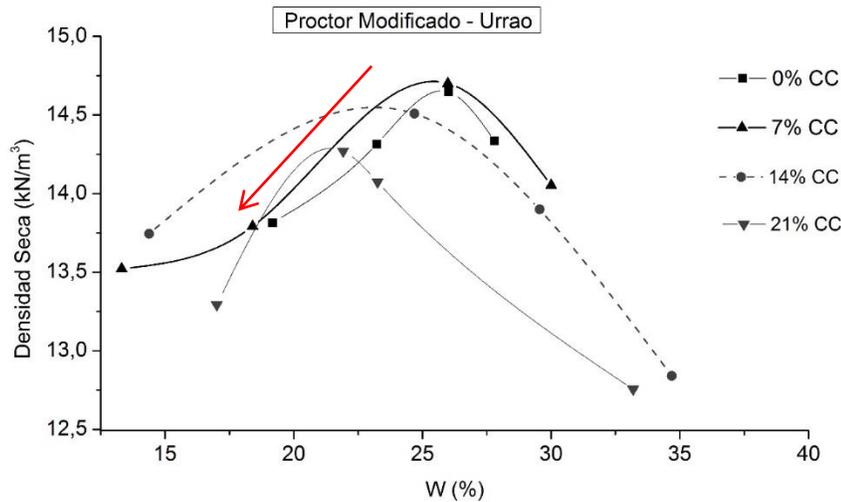
Se presenta en la Tabla 7 óxidos de silicio en grandes cantidades que en composición constituyen más del 50% en peso, otros como óxidos de aluminio, hierro y sodio también se encuentran presentes y están asociados a la albita.

5.3. PROCTOR MODIFICADO

5.3.1. URRAO

Los resultados de Proctor Modificado para el suelo de Urrao y la adición de CC se pueden observar en la Gráfica 10.

Gráfica 10: Ensayo Proctor Modificado - Urrao



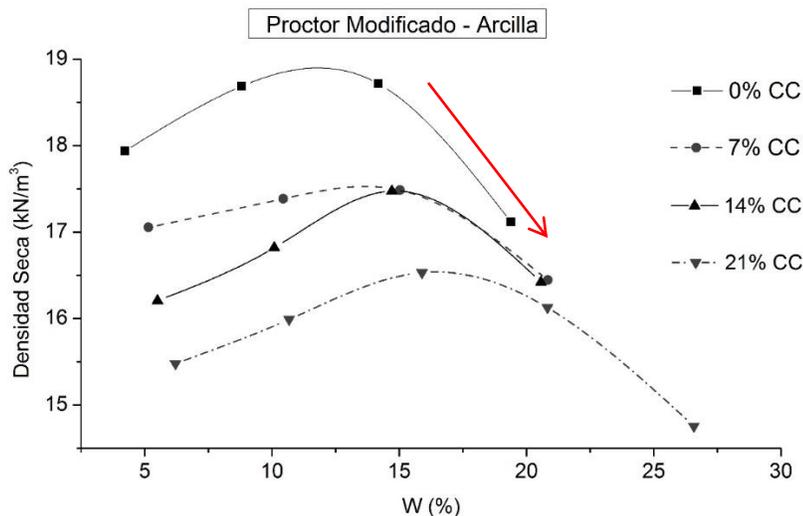
Se puede observar en la Gráfica 10 que el suelo de urrao poseía una baja densidad máxima seca, y llegó a un máximo de 14.75 kN/m³ cuando se adiciono 7% de CC, y desde este punto su densidad máxima seca disminuyo con las adiciones de 14% y 21% de CC, siendo la adición de 21% de CC la densidad máxima seca más baja obtenida en los ensayos del suelo de Urrao con el valor de 14.25 kN/m³.

La humedad óptima de las mezclas con 0% y 7% de CC no varió significativamente, pero al aumentar la cantidad de ceniza la humedad óptima fue disminuyendo hasta llegar a un mínimo aproximado de 21% con la adición de 21% de CC.

5.3.2. ARCILLA

Para la evaluación de compactación Proctor la humedad de partida del suelo arcilloso fue de 2%

Gráfica 11: Ensayo Proctor Modificado - Arcilla



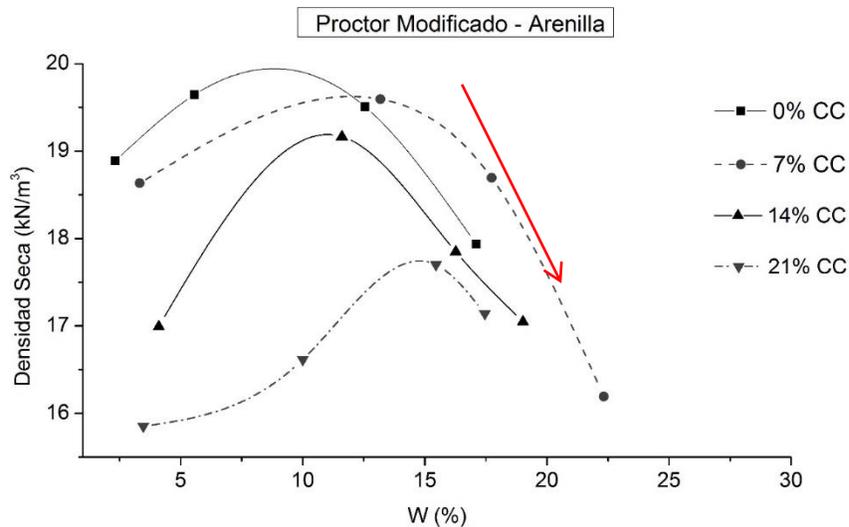
Para la En la Gráfica 11 se observa que las mezclas con la adición de CC la densidad máxima seca disminuye siendo la máxima de 18.8 kN/m^3 con 0% de CC, y la mínima de 16.5 kN/m^3 con 21% de CC.

La humedad óptima de las muestras aumento con la adición de ceniza, siendo la más baja de 12% para la adición de 0% de CC y la más alta de 16% para la adición de 21% de CC; La humedad óptima para las adiciones de 7% y 14% de CC no tuvieron un cambio considerable.

5.3.3. ARENILLA

La humedad base para los proctor con arenilla fue de 2%.

Gráfica 12: Ensayo Proctor Modificado - Arenilla



En la Gráfica 12 se puede observar que la densidad máxima seca disminuyo con la adición de CC, siendo 19.9 kN/m^3 con la adición de 0% de CC la densidad máxima seca más alta, y 17.5 kN/m^3 con la adición de 21% la densidad máxima seca más baja.

La humedad óptima aumento con la adición de CC, siendo 10% para la adición de 0% de CC la humedad óptima más baja y 15% para la adición de 21% de CC la humedad óptima más alta. La humedad óptima para las adiciones de 7% y 14% de CC no tuvieron una variación considerable.

5.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

Para la ejecución experimental se plantea un diseño factorial $3^2 \times 2^2$ con una replica, donde se identifican los siguientes factores y sus niveles.

Tabla 18: Factores y Niveles

Factor	Niveles	Incidencia
Tipo de suelo	1. <i>Suelo Urrao</i>	Los suelos con diferentes características granulométricas y de plasticidad presentan, propiedades mecánicas finales diferentes. Lo que sugiere que su forma de estabilización no sea la misma.
	2. <i>Suelo Arcilloso</i>	
	3. <i>Suelo Arenoso</i>	
Adición de CC	1. <i>Adición 7%</i>	El porcentaje de adición permitirá definir las mejores proporciones para lograr buenas resistencias a compresión simple.
	2. <i>Adición 14%</i>	
	3. <i>Adición 21%</i>	
Temperatura	1. <i>(20-30)°C</i>	La temperatura determina la cinética de la reacción química de la ceniza con los hidróxidos alcalinos, lo cual puede acelerar el proceso de estabilización en cortos periodos de tiempo
	2. <i>(40-50)°C</i>	

Se diseñó una matriz experimental bajo la cual se realizaron dos corridas experimentales.

- Corrida 1 de la matriz experimental: Cuando la humedad de fallado fue ambiente
- Corrida 2 de la matriz experimental: Cuando la humedad de fallado fue superior a 95%

En la Tabla 19 se muestra la matriz experimental aleatorizada arrojada por el programa MiniTab para la Corrida 1 y 2.

Tabla 19: Corrida 1 – MiniTab

Orden	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo
1	(20 -30)	14%	Arcilla
2	(40 - 50)	14%	Urrao
3	(40 - 50)	7%	Urrao
4	(20 -30)	14%	Urrao
5	(20 -30)	14%	Arenilla
6	(40 - 50)	7%	Arenilla
7	(20 -30)	7%	Urrao
8	(40 - 50)	21%	Urrao
9	(40 - 50)	7%	Arcilla
10	(20 -30)	21%	Arcilla
11	(40 - 50)	21%	Arenilla
12	(40 - 50)	14%	Arcilla
13	(40 - 50)	14%	Arenilla
14	(20 -30)	14%	Arenilla
15	(20 -30)	21%	Urrao
16	(20 -30)	14%	Urrao
17	(40 - 50)	7%	Arcilla
18	(40 - 50)	21%	Arenilla
19	(40 - 50)	14%	Arenilla
20	(20 -30)	21%	Arenilla
21	(40 - 50)	14%	Arcilla
22	(20 -30)	7%	Arenilla
23	(40 - 50)	7%	Urrao

Orden	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo
24	(20 -30)	7%	Arcilla
25	(20 -30)	7%	Arenilla
26	(20 -30)	14%	Arcilla
27	(40 - 50)	7%	Arenilla
28	(40 - 50)	14%	Urrao
29	(40 - 50)	21%	Arcilla
30	(20 -30)	7%	Urrao
31	(20 -30)	21%	Urrao
32	(20 -30)	21%	Arcilla
33	(40 - 50)	21%	Arcilla
34	(20 -30)	7%	Arcilla
35	(40 - 50)	21%	Urrao
36	(20 -30)	21%	Arenilla

5.4.1. TABLAS DE RESULTADOS

La densidad promedio de las probetas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Densidad Promedio

Suelo	Densidad Promedio (g/cm ³)	Desviación Estándar (g/cm ³)
Arcilla	1.44	0.06
Arenilla	1.60	0.11
Urrao	1.23	0.08

En las Tabla 21 y 22 se muestran todos los resultados obtenidos en la ejecución experimental. Las celdas con el valor de 0, indican que las probetas no lograron ser falladas debido a que se dañaron en el método de curado.

5.4.1.1. CORRIDA 1

Tabla 21: Resultados Matriz Experimental – Humedad Ambiente

Mezcla	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
1	(40-50)	14%	Arcilla	48.02	43.31
2	(40-50)	14%	Urrao	165.79	46.81
3	(20 -30)	7%	Urrao	487.34	81.18
4	(40-50)	14%	Urrao	267.00	51.55
5	(20 -30)	14%	Arenilla	0.00	0.00
6	(40-50)	7%	Arenilla	171.26	26.93
7	(20 -30)	7%	Urrao	211.34	13.62
8	(20 -30)	21%	Urrao	224.81	132.52
9	(40-50)	7%	Arcilla	0.00	0.00
10	(40-50)	21%	Arcilla	135.08	17.97
11	(20 -30)	21%	Arenilla	43.68	51.65
12	(40-50)	14%	Arcilla	321.26	83.16
13	(20 -30)	14%	Arenilla	0.00	0.00

Mezcla	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
14	(20 -30)	14%	Arenilla	85.26	26.17
15	(40-50)	21%	Urrao	193.31	68.25
16	(40-50)	14%	Urrao	212.86	108.54
17	(40-50)	7%	Arcilla	325.37	93.27
18	(20 -30)	21%	Arenilla	112.48	50.80
19	(40-50)	14%	Arenilla	0.00	0.00
20	(20 -30)	21%	Arenilla	0.00	0.00
21	(40-50)	14%	Arcilla	366.25	320.24
22	(20 -30)	7%	Arenilla	14.55	25.20
23	(20 -30)	7%	Urrao	215.21	39.76
24	(20 -30)	7%	Arcilla	172.63	42.24
25	(20 -30)	7%	Arenilla	3.35	5.80
26	(20 -30)	14%	Arcilla	43.13	74.71
27	(40-50)	7%	Arenilla	0.00	0.00
28	(40-50)	14%	Urrao	256.28	146.03
29	(40-50)	21%	Arcilla	383.68	336.28
30	(20 -30)	7%	Urrao	55.05	29.38
31	(40-50)	21%	Urrao	44.11	45.79
32	(40-50)	21%	Arcilla	27.78	48.12
33	(20 -30)	21%	Arcilla	293.99	259.82
34	(20 -30)	7%	Arcilla	16.88	29.23
35	(40-50)	21%	Urrao	98.74	99.28
36	(20 -30)	21%	Arenilla	13.40	23.22

5.4.1.2. CORRIDA 2

Tabla 22: Resultados Matriz Experimental – Humedad >95%

Mezcla	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
1	(40-50)	14%	Arcilla	62.93	59.88
2	(20 -30)	14%	Urrao	70.45	70.40
3	(20 -30)	7%	Urrao	17.04	29.52
4	(20 -30)	14%	Urrao	219.13	27.81
5	(40-50)	14%	Arenilla	200.57	24.66
6	(20 -30)	7%	Arenilla	0.00	0.00
7	(20 -30)	7%	Urrao	270.33	56.35
8	(20 -30)	21%	Urrao	163.74	34.47
9	(40-50)	7%	Arcilla	0.00	0.00
10	(20 -30)	21%	Arcilla	153.93	114.17
11	(40-50)	21%	Arenilla	0.00	0.00
12	(20 -30)	14%	Arcilla	0.00	0.00
13	(40-50)	14%	Arenilla	0.00	0.00
14	(40-50)	14%	Arenilla	0.00	0.00
15	(40-50)	21%	Urrao	34.41	30.21
16	(20 -30)	14%	Urrao	120.61	15.20
17	(40-50)	7%	Arcilla	0.00	0.00
18	(40-50)	21%	Arenilla	0.00	0.00
19	(40-50)	14%	Arenilla	0.00	0.00
20	(40-50)	21%	Arenilla	46.92	20.30

Mezcla	Temperatura (°C)	Porcentaje de Adición (%)	Tipo de Suelo	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
21	(20 -30)	14%	Arcilla	0.00	0.00
22	(20 -30)	7%	Arenilla	129.11	32.39
23	(40-50)	7%	Urrao	0.00	0.00
24	(40-50)	7%	Arcilla	82.58	71.94
25	(20 -30)	7%	Arenilla	52.21	19.84
26	(20 -30)	14%	Arcilla	68.52	70.56
27	(40-50)	7%	Arenilla	0.00	0.00
28	(20 -30)	14%	Urrao	20.15	20.19
29	(20 -30)	21%	Arcilla	0.00	0.00
30	(20 -30)	7%	Urrao	232.57	35.65
31	(40-50)	21%	Urrao	16.95	29.36
32	(40-50)	21%	Arcilla	0.00	0.00
33	(40-50)	21%	Arcilla	23.21	40.20
34	(40-50)	7%	Arcilla	73.69	63.96
35	(20 -30)	21%	Urrao	0.00	0.00
36	(20 -30)	21%	Arenilla	0.00	0.00

5.4.1.3. SUELOS PATRÓN

5.4.1.3.1. PATRÓN CON AGUA

En la Tabla 23 muestra los resultados obtenidos de los suelos patrón sin adición de CC, utilizando el agua necesaria para obtener la humedad óptima.

Tabla 23: Resultados Patrón – H2O

Mezcla	Temperatura (°C)	Humedad	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
Arenilla	(40-50)	Ambiente	810.05	173.18
	(40-50)	>95%	132.93	52.64
	(20 -30)	Ambiente	645.82	172.09
	(20 -30)	>95%	613.50	11.12
Arcilla	(40-50)	Ambiente	1207.48	111.61
	(40-50)	>95%	363.66	151.48
	(20 -30)	Ambiente	845.68	138.44
	(20 -30)	>95%	777.69	101.45
Urrao	(40-50)	Ambiente	1457.12	338.58
	(40-50)	>95%	539.26	51.59
	(20 -30)	Ambiente	899.25	96.20
	(20 -30)	>95%	1044.20	179.99

5.4.1.3.2. PATRÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO 3.5 M

Los resultados obtenidos en la Tabla 24 corresponden a los suelos patrón sin adición de CC, utilizando una solución de NaOH a 3.5 M. La cantidad de solución utilizada fue la equivalente para lograr la humedad óptima en cada uno de los suelos.

Tabla 24: Resultados Patrón – Hidróxido de Sodio

Mezcla	Temperatura (°C)	Humedad	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
Arenilla	(40-50)	Ambiente	715.59	303.29
	(40-50)	>95%	341.98	14.11
	(20 -30)	Ambiente	495.81	84.44
	(20 -30)	>95%	377.59	21.42
Arcilla	(40-50)	Ambiente	1118.29	976.01
	(40-50)	>95%	590.42	74.93
	(20 -30)	Ambiente	967.72	320.19
	(20 -30)	>95%	541.77	215.87
Urrao	(40-50)	Ambiente	336.63	64.59
	(40-50)	>95%	387.21	85.46
	(20 -30)	Ambiente	482.77	63.03
	(20 -30)	>95%	333.86	36.12

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.2. PROCTOR MODIFICADO

Se presenta un análisis de los ensayos Proctor Modificado para los diferentes tipos de materiales utilizados con la adición de CC. Se observó para todos los casos que incrementos de adición de CC, disminuían la densidad máxima, esto puede estar asociado a la alta cantidad de carbón inquemado que presenta la ceniza.

6.2.1. URRAO

Se pudo observar en la Gráfica 10 que existe una tendencia a disminuir en este suelo la humedad óptima y la densidad máxima cuando se incorporan porcentajes de adición de CC superiores al 7%.

Cuando se usó CC al 21%, la densidad máxima sufrió una disminución del 3.4% respecto al suelo patrón, y la humedad óptima se vió disminuida en 5 puntos porcentuales, lo que puede desfavorecer la formación de compuestos cementantes al tener menor cantidad de solución activadora cuando aumenta la cantidad de CC adicionada al suelo.

6.2.2. ARCILLA

Respecto a la humedad óptima; la arcilla presentó un comportamiento contrario al del suelo de Urrao, ver Gráfica 11, la flecha roja indica que existe una tendencia a presentar mayor contenido de humedad cuando se aumenta el porcentaje de CC. En el caso de densidad máxima disminuyó con el aumento del porcentaje de CC.

Con el uso de 21% de CC, la densidad presentó una disminución del 11.70% respecto al suelo sin adición de CC. En cuanto a la humedad óptima se aumentó en 4.30 puntos porcentuales.

Se observó que las adiciones de CC de 7% y 14% presentaron la misma densidad máxima al igual que la humedad óptima; con una disminución de la densidad máxima del 7.45% y un aumento de la humedad óptima de 2,50 puntos porcentuales respecto al patrón.

Mayor humedad óptima indica mayor cantidad de solución activadora, lo que garantiza una mejor formación de fases cementantes.

6.2.3. ARENILLA

En la Grafica 12 se pudo observar que la Arenilla tuvo un comportamiento similar al de la Arcilla, en el cual la densidad máxima disminuía a medida que se adicionaba CC y la humedad óptima aumentaba cuando se incrementa el porcentaje de adición de CC.

En relación a la muestra patrón 0% de ceniza, el suelo con adición de CC del 21%, presentó un aumento de 5.50 puntos porcentuales en la humedad óptima, y una disminución de la densidad óptima de 11.50%. En cuanto a la adición de 14% de CC, disminuyó la densidad máxima en 4.00% y presentó un aumento de 1 punto porcentual en la humedad óptima.

Al igual que en la arcilla una mayor humedad óptima indica mayor cantidad de solución activadora, lo que garantiza una mejor formación de fases cementantes.

6.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

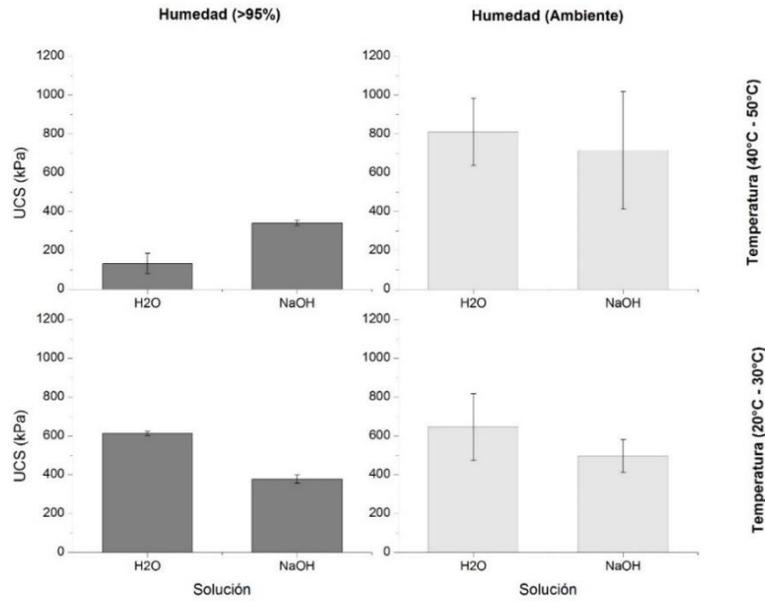
6.3.1. COMPARACIÓN NaOH vs H₂O

En los gráficos 13,14,15 se observan de manera comparativa los resultados de la resistencia mecánica a compresión no confinada de los diferentes tipos de suelo mezclados con NaOH como solución activadora y agua, y a condiciones de temperatura variable entre 40°C y 50°C.

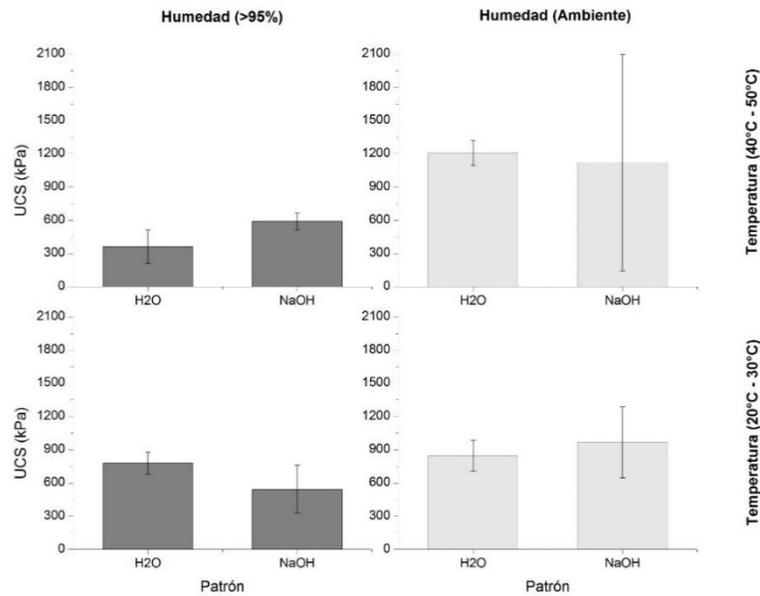
Se observa en la Gráfica 13, que hay diferencia entre la Arenilla evaluada entre 40°C y 50°C y a humedad mayor a 95% cuando se cambia de agua a NaOH. Significativamente existe un aumento de la resistencia debido al NaOH correspondiente a 257%. Esto indica que con el uso de NaOH en la arenilla el aumento de la resistencia está asociado a una mayor temperatura de curado.

Se observa que hay diferencia entre la Arenilla evaluada entre 20°C y 50 °C y humedad mayor a 95% cuando se cambia de agua a NaOH. Significativamente existe una disminución de la resistencia debido al NaOH correspondiente a -62%.

Gráfica 13: Arenilla – NaOH vs H₂O

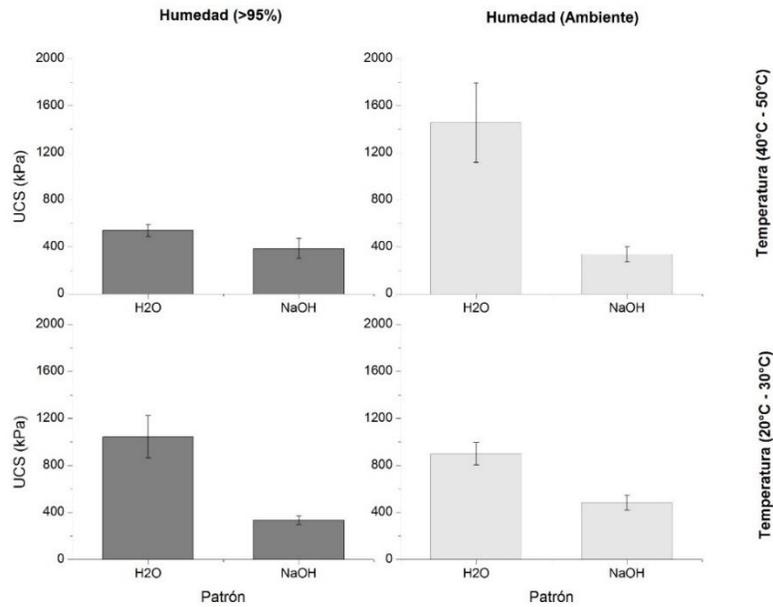


Gráfica 14: Arcilla – NaOH vs H₂O



En la Gráfica 14 se observa que no hay diferencias significativas en la Arcilla por efectos de los activadores agua y NaOH, ya que los corchetes de errores se interceptan indicando que estadísticamente son iguales.

Gráfica 15: Urrao NaOH vs H₂O



En la Gráfica 15 se observa que hay diferencia entre el suelo de Urrao evaluado entre 40°C y 50°C y a humedad ambiente cuándo se cambia de agua a NaOH. Significativamente existe una disminución de la resistencia debido al NaOH correspondiente a 77%.

Se observa además que hay diferencia entre el suelo de Urrao evaluado entre 20°C y 50°C cuándo se cambia de agua a NaOH. Significativamente existe una disminución de la resistencia debido al NaOH correspondiente a 32% a humedad mayor al 95% y 54% a humedad ambiente.

6.3.2. ANALISIS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES

Los resultados presentados en la Tabla 22 y Tabla 23 se analizaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA) usando el software Minitab; en la Tabla 26 y Tabla 29 se presenta un resumen de los valores p obtenidos para cada uno de los factores y su interacción. Para el ANOVA planteado, la hipótesis nula consiste en que los factores Temperatura, Tipo de suelo y porcentaje de adición de CC no tienen ningún efecto significativo sobre las resistencias mecánicas a compresión simple. Para una significancia $\alpha = 0.05$ es decir con una confianza asociada de $\beta = 95\%$, se puede decir que si el valor- p es menor que α , se rechaza la hipótesis nula.

6.3.2.1. CORRIDA 1

Análisis de la Corrida 1 de la matriz experimental: Cuando la humedad de fallado fue ambiente

En la Tabla 25 se muestran los resultados arrojados por el análisis estadístico ANOVA.

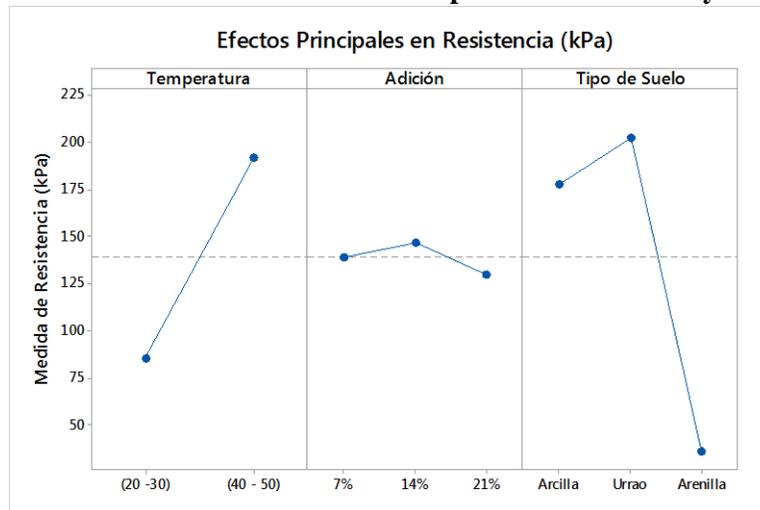
Tabla 25: Análisis Estadístico ANOVA – Corrida 1

<i>Factor en la Regresión</i>	<i>GL</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>Valor - F</i>	<i>Valor - P</i>
Modelo	17	456077	26828	2,84	0,017
Lineal	5	296965	59393	6,29	0,002
<i>Temperatura</i>	1	101590	101590	10,76	0,004
<i>Adición</i>	2	1752	876	0,09	0,912
<i>Tipo de Suelo</i>	2	193623	96811	10,26	0,001
2-Formas de Interacción	8	92151	11519	1,22	0,342
<i>Temperatura*Adición</i>	2	4242	2121	0,22	0,801
<i>Temperatura*Tipo de Suelo</i>	2	49343	24671	2,61	0,101
<i>Adición*Tipo de Suelo</i>	4	38567	9642	1,02	0,423
3-Formas de Interacción	4	66961	16740	1,77	0,178
<i>Temperatura*Adición*Tipo de Suelo</i>	4	66961	16740	1,77	0,178
Error	18	169923	9440		
Total	35	626000			

Según el análisis estadístico ANOVA, el VALOR *p* se vuelve significativo cuando es menor que 0.05 demostrando que los factores temperatura y tipo de suelo se pueden analizar de forma independiente, lo que permite identificar que el modelo que mejor se ajusta es el lineal.

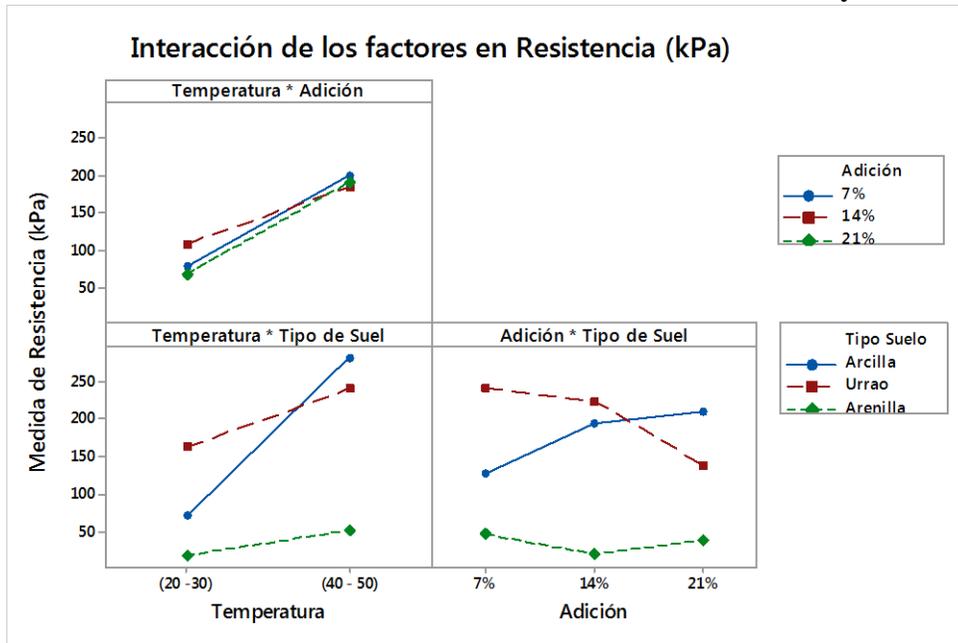
En la Gráfica 16 se muestran los resultados de la Corrida 1 en los principales efectos sobre los ensayos UCS.

Gráfica 16: Corrida 1 – Efectos Principales Sobre los Ensayos UCS



En la Gráfica 17 se muestran los resultados de la Corrida 1 en la interacción de los diferentes efectos sobre los ensayos de UCS.

Gráfica 17: Corrida 1 – Interacción de los Efectos Sobre los Ensayos UCS



Se identifica que el factor que mayor influencia tiene en la resistencia UCS en estas condiciones es el tipo de suelo, seguido de la temperatura. Las diferentes dosificaciones de CC no tienen una gran influencia en la resistencia UCS.

Bajo las condiciones de evaluación de humedad ambiente, no se observan aumentos significativos de la resistencia con el incremento de la adición de CC, las mejores condiciones se alcanzan con la adición del 14% de CC

El incremento en la adición de CC a la Arcilla, permitió obtener un aumento en las resistencias mecánicas respecto a porcentajes de adición bajos.

La adición de CC en la Arenilla no es significativa ya que con el incremento de la adición no hay un aumento ni disminución apreciable de las resistencias.

El incremento de la adición de CC al suelo de Urrao generó un efecto negativo, ya que al aumentar el % de adición disminuyó sustancialmente la resistencia mecánica.

En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos al comparar los materiales con adición de CC y patrón con agua.

Tabla 26: Resultados Adición CC y Patrón Agua

Material	Temperatura (°C)	UCS (kN)	UCS Promedio Patrón (kN)	UCS Promedio CC (kN)	Reducción de UCS
Arcilla	(40-50)	1207.48	1026.58	175.00	83%
	(20 -30)	845.68			
Urrao	(40-50)	1457.12	1178.19	200.00	83%
	(20 -30)	899.25			
Arenilla	(40-50)	810.05	727.94	45.00	94%
	(20 -30)	645.82			

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la adición de CC bajo las condiciones evaluadas presentó en promedio una disminución del 83% de la resistencia cuándo fue adicionada a la Arcilla y al suelo de Urrao, de igual manera cuándo se adicionó CC al suelo Arenilla las resistencias se redujeron en promedio en 94%. Lo que indica que su efecto de la CC utilizada fue negativo.

En la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos al comparar los materiales con adición de CC y patrón con NaOH.

Tabla 27: Resultados Adición CC y Patrón NaOH

Material	Temperatura (°C)	UCS (kN)	UCS Promedio Patrón (kN)	UCS Promedio CC(kN)	Reducción de UCS
Arcilla	(40-50)	1118.29	1043.00	175.00	83%
	(20 -30)	967.72			
Urrao	(40-50)	336.63	409.70	200.00	51%
	(20 -30)	482.77			
Arenilla	(40-50)	715.59	605.70	45.00	93%
	(20 -30)	495.81			

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la adición de CC bajo las condiciones evaluadas presentó en promedio una disminución del 83% de la resistencia cuándo fue adicionada a la Arcilla, de igual manera cuándo se adicionó CC a la Arenilla las resistencias se redujeron en promedio en 93%. Lo que indica que su efecto de la CC utilizada fue negativo. La disminución de la resistencia con respecto al suelo de Urrao fue del 51%.

6.3.2.2. CORRIDA 2

Análisis Corrida 2 de la matriz experimental: Cuando la humedad de fallado fue superior a 95%

En la Tabla 28 se muestran los resultados arrojados por el análisis estadístico ANOVA.

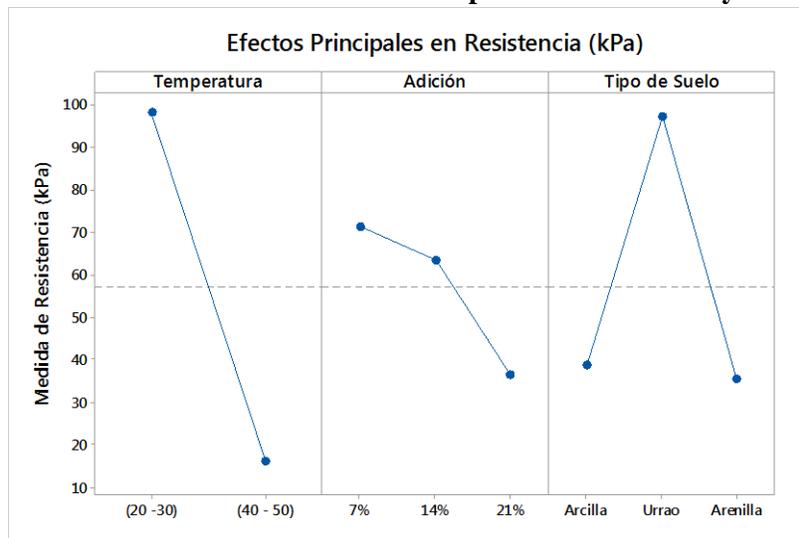
Tabla 28: Análisis Estadístico Anova - Corrida 2

<i>Factor en la Regresión</i>	<i>GL</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>Valos - F</i>	<i>Valor - P</i>
Modelo	17	156028	9178	2,90	0,015
Lineal	5	96797	19359	6,12	0,002
Temperatura	1	60028	60028	18,99	0,000
Adición	2	8017	4009	1,27	0,305
Tipo de Suelo	2	28751	14376	4,55	0,025
2-Formas de Interacción	8	35228	4403	1,39	0,265
Temperatura*Adición	2	24995	12497	3,95	0,038
Temperatura*Tipo de Suelo	2	2208	1104	0,35	0,710
Adición*Tipo de Suelo	4	8025	2006	0,63	0,644
3-Formas de Interacción	4	24004	6001	1,90	0,154
Temperatura*Adición*Tipo de Suelo	4	240041	6001	1,90	0,154
Error	18	56894	3161		
Total	35	212923			

LA ANOVA reporta que el factor temperatura y el tipo de suelo no cumplen la hipótesis nula, definiendo éstos factores como los que más afectan a la resistencia mecánica.

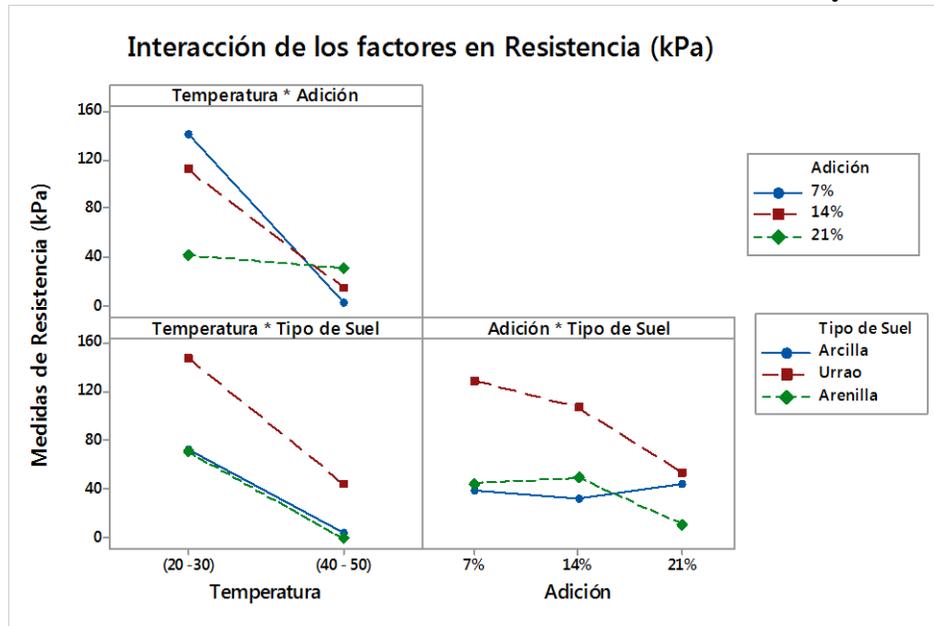
En la Gráfica 18 se muestran los resultados de la Corrida 2 en los principales efectos sobre los ensayos UCS.

Gráfica 18: Corrida 2 – Efectos Principales Sobre los Ensayos UCS



En la Gráfica 19 se muestran los resultados de la Corrida 2 en la interacción de los diferentes efectos sobre los ensayos de UCS.

Gráfica 19: Corrida 2 – Interacción de los Efectos Sobre los Ensayos UCS



Bajo las condiciones de evaluación a humedad ambiente, no se observan aumentos significativos de la resistencia con el incremento de la adición de CC, las mejores condiciones se alcanzan con la adición del 7% de cenizas de carbón.

El efecto que mayor influencia presenta sobre la variable respuesta es la temperatura, donde a mayor temperatura se obtienen valores de resistencia menores.

La adición de CC en la Arcilla no es significativa, ya que con el incremento de la adición de CC no hay aumento ni disminución apreciable de las resistencias.

Valores de adición de CC por encima de 14% en la Arenilla indican bajas resistencias mecánicas.

El incremento de la adición de CC al suelo de Urrao generó un efecto negativo, ya que al aumentar el porcentaje de adición disminuyó sustancialmente la resistencia mecánica.

En la Tabla 29 se muestran los resultados obtenidos al comparar los materiales con adición de CC y patrón con agua.

Tabla 29: Resultados Adición CC y Patrón Agua

Material	Temperatura (°C)	UCS (kN)	UCS	UCS	Reducción de UCS
			Promedio Patrón (kN)	Promedio CC (kN)	
Arcilla	(40-50)	363.66	570.67	40.00	93%
	(20-30)	777.69			
Urrao	(40-50)	539.26	791.73	100.00	87%
	(20-30)	1044.20			
Arenilla	(40-50)	132.93	373.22	40.00	89%
	(20-30)	613.50			

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la adición de CC bajo las condiciones evaluadas presentó en promedio una disminución del 93% de la resistencia cuándo fue adicionada a la Arcilla, de igual manera cuándo se adicionó CC al suelo de Urrao y a la Arenilla las resistencias se redujeron en promedio en 87% y 89% respectivamente. Lo que indica que su efecto de la CC utilizada fue negativo.

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos al comparar los materiales con adición de CC y patrón con NaOH.

Tabla 30: Resultados Adición CC y Patrón NaOH

Material	Temperatura (°C)	UCS (kN)	UCS Promedio Patrón (kN)	UCS Promedio CC (kN)	Reducción de UCS
Arcilla	(40-50)	590.42	566.09	40.00	93%
	(20 -30)	541.77			
Urrao	(40-50)	387.21	360.53	100.00	72%
	(20 -30)	333.86			
Arenilla	(40-50)	341.98	359.79	40.00	89%
	(20 -30)	377.59			

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la adición de CC bajo las condiciones evaluadas presentó en promedio una disminución del 93% de la resistencia cuándo fue adicionada a la Arcilla, de igual manera cuándo se adicionó CC al suelo de Urrao y a la Arenilla las resistencias se redujeron en promedio en 72% y 89% respectivamente. Lo que indica que su efecto de la CC utilizada fue negativo.

- **Conclusiones Parciales**

Se observó en el suelo de Urrao sin adición de CC, que al usar NaOH reduce su UCS en todos los casos, por lo que suelos con contenidos de gibsita $Al(OH)_3$ deben estudiarse más a fondo.

El uso de NaOH en la Arenilla sin adición de CC a temperaturas entre 40°C y 50°C aumentó la resistencia en un 257%, pero a temperaturas entre 20°C y 30°C la resistencia se redujo un 62%, por lo que se recomienda solo usar NaOH en suelos como la Arenilla en condiciones de humedad superior a 95% y temperatura entre 40°C y 50°C.

El uso de NaOH en la Arcilla sin adición de CC no presento un efecto significativo con respecto al uso de agua, pues no se observan cambios en los ensayos UCS.

El tamaño de partícula de la CC tuvo una gran influencia en la experimentación, se observo que la ceniza tuvo un efecto negativo en todas las muestras y las probetas con CC demostraron ser más susceptibles a dañarse que las muestras patrón. Esto se puede deber a que al ser una ceniza gruesa con porcentaje de carbón inquemado alrededor del 50% y con tamaños de partícula superiores a 100µm indicando una baja probabilidad de cementación y hacen una función de filler o material de lleno.

A este punto de la experimentación, el uso de CC tiene un efecto negativo en las muestras y no lograron la resistencia mínima de 2100 kPa exigida por la norma INVIAS Artículo - 350.4.1 para muestras de suelo – cemento, por lo que se propuso realizar muestras con CC más finas.

7. DISEÑO ALTERNATIVO

El diseño experimental anterior demostró que la dosificación de 7% de CC poseía las mejores condiciones de resistencia para una condición de humedad ambiente, mientras que la dosificación de 14% de CC poseía las mejores condiciones de resistencia para una condición de humedad mayor al 95%; es por lo tanto que se decide realizar un diseño siguiendo la teoría de que a mayor porcentaje de CC mayor será la resistencia.

Se realizó el mismo procedimiento descrito en el diseño experimental para la misma CC tamizada por malla N°40 y luego fueron comparadas con suelo patrón con NaOH y CC proveniente de la empresa Coltejer (CColtejer) de la cual se conoce tiene altas propiedades cementantes (Yepes Gaviria & Bedoya Montoya, 2012).

También se muestran resultados de la investigación en mezclas con CColtejer, y suelo de Urrao tamizado por malla N° 50 en dosificaciones de 7% y 30% en formaletas cubicas de 5cmx5cm, usando hidróxido de sodio en solución como activador, para luego ser comparadas con mezclas del mismo suelo de Urrao y cemento Pórtland al 7%. Todas las muestras fueron curadas a condiciones de humedad ambiente y temperatura entre 20°C y 30°C.

7.2. RESULTADOS

En las Tablas 31, 32 y 33, se muestran los resultados obtenidos. Todas las probetas fueron secadas al horno un día antes del fallado.

Tabla 31: Resultados – Suelo Patrón NaOH 3.5M (NaOH)

Mezcla	Temperatura (°C)	Humedad	Resistencia promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
Arenilla	(40-50)	Ambiente	0.00	0.00
	(40-50)	>95%	147.83	45.74
	(20 -30)	Ambiente	285.35	50.07
	(20 -30)	>95%	334.33	92.55
Arcilla	(40-50)	Ambiente	1942.49	437.53
	(40-50)	>95%	1115.51	12.03
	(20 -30)	Ambiente	1426.13	339.22
	(20 -30)	>95%	1440.58	383.08
Urrao	(40-50)	Ambiente	265.11	293.94
	(40-50)	>95%	592.44	65.96
	(20 -30)	Ambiente	526.84	109.77
	(20 -30)	>95%	324.02	41.91

Tabla 32: Resultados – Ceniza Tamizada Malla N° 40 3.5M (NaOH)

Mezcla	Temperatura (°C)	Humedad	Resistencia promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
Arenilla	(40-50)	Ambiente	57.29	0.01
	(40-50)	>95%	37.82	0.08
	(20 -30)	Ambiente	122.24	0.03
	(20 -30)	>95%	131.12	0.02
Arcilla	(40-50)	Ambiente	738.30	0.93
	(40-50)	>95%	518.44	0.02
	(20 -30)	Ambiente	699.32	0.14
	(20 -30)	>95%	609.45	0.20
Urrao	(40-50)	Ambiente	355.22	0.11
	(40-50)	>95%	0.00	0.00
	(20 -30)	Ambiente	357.61	0.02
	(20 -30)	>95%	266.61	0.20

Tabla 33: Resultados – CColtejer 3.5M (NaOH)

Mezcla	Temperatura (°C)	Humedad	Resistencia promedio (kPa)	Desviación Resistencia (kPa)
Arenilla	(40-50)	Ambiente	347.56	7.83
	(40-50)	>95%	350.49	137.59
	(20 -30)	Ambiente	233.67	71.01
	(20 -30)	>95%	523.73	130.50
Arcilla	(40-50)	Ambiente	1226.96	175.24
	(40-50)	>95%	933.51	374.60
	(20 -30)	Ambiente	990.42	178.17
	(20 -30)	>95%	790.51	422.62
Urrao	(40-50)	Ambiente	398.04	107.84
	(40-50)	>95%	374.57	40.34
	(20 -30)	Ambiente	560.43	395.06
	(20 -30)	>95%	155.75	136.88

Se puede observar en la Tabla 34 los resultados obtenidos con las CColteje, y cemento Pórtland con suelo de Urrao tamizado por malla N°50, usando en las mezclas de CColtejer hidróxido de sodio como solución activadora a 8M.

Tabla 34: Resultados – CColtejer vs Cemento Pórtland – 8M (NaOH)

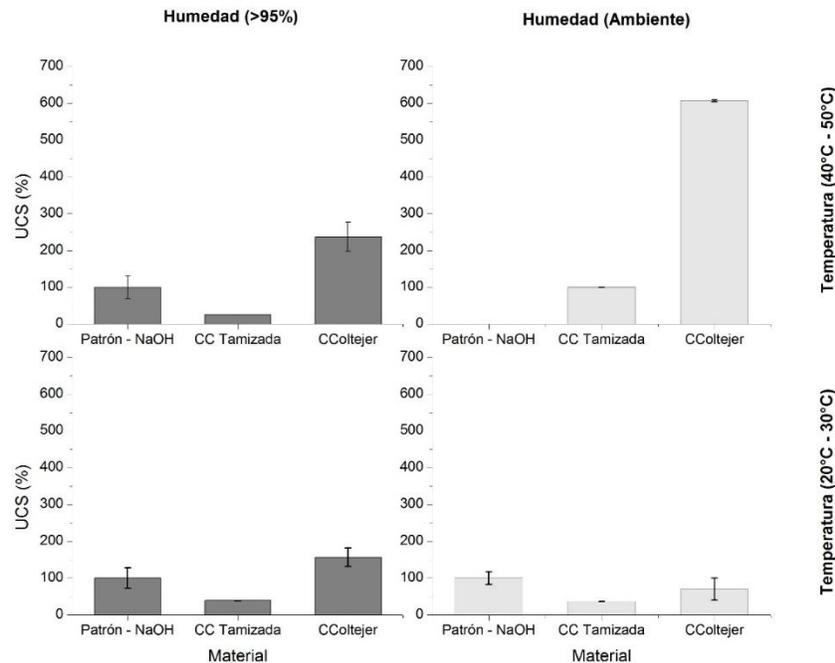
Material de Reemplazo	Porcentaje de Reemplazo (%)	Resistencia Promedio (kPa)	Desviación Estándar Resistencia (kPa)
Cemento Pórtland	7	736.00	103.92
CColtejer	7	1302.67	78.52
	30	3880.00	545.98

7.3. ANALÍISIS DE RESULTADOS

7.3.1. ARENILLA

En la Gráfica 20 se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la Arenilla a las diferentes condiciones de curado y tipo de mezcla. Las gráficas de CC tamizada y CColtejer se presentan en porcentaje con respecto a la gráfica patrón de NaOH, siendo ésta el 100%.

Gráfica 20: Arenilla – NaOH vs CC vs CColtejer – 3.5M (NaOH)



Nota: Para la condición Humedad(Ambiente) – Temperatura (40°C – 50°C) las muestras patrón con NaOH no fueron posibles de fallar, por lo que la CColtejer está expresada en porcentaje con respecto a la CC Tamizada.

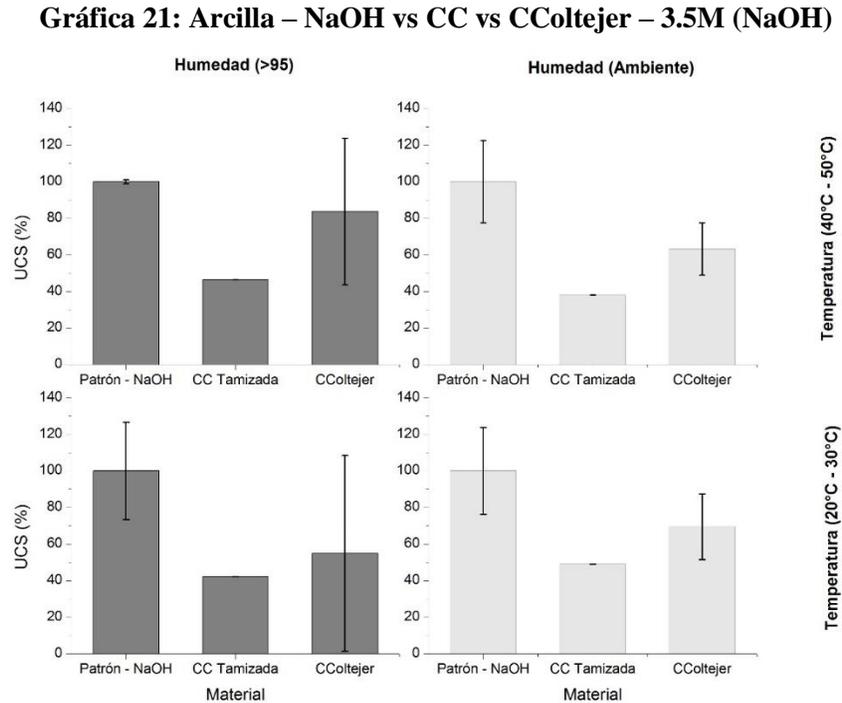
Se observa que hay diferencia de la Arenilla evaluada entre la CC tamizada y el suelo patrón con NaOH a 3.5 M, donde se observa una disminución de la resistencia en todas las condiciones de temperatura y humedad (sin incluir la condición Humedad (Ambiente) – Temperatura (40°C – 50°C)).

La Arenilla tuvo un aumento significativo de la resistencia cuando se usó CColtejer en condiciones de Humedad(>95%) – Temperatura (40°C - 50°C) correspondiente a 237% con respecto al suelo patrón con NaOH, a 3.5 M al igual que en condiciones Humedad (Ambiente) – Temperatura (40°C – 50°C) correspondiente a 607%.

Se tiene un intervalo de confianza muy alto de la CC tamizada en todas las condiciones de curado en la Arenilla evaluada

7.3.2. ARCILLA

En la Gráfica 21 se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la Arcilla a las diferentes condiciones de curado y tipo de mezcla. Las gráficas de CC tamizada y CColtejer se presentan en porcentaje con respecto a la gráfica patrón de NaOH a 3.5 M, siendo ésta el 100%.



Se observa que no hay diferencia de la Arcilla evaluada entre la CColtejer y el suelo patrón con NaOH a 3.5 M en ninguna condición de curado.

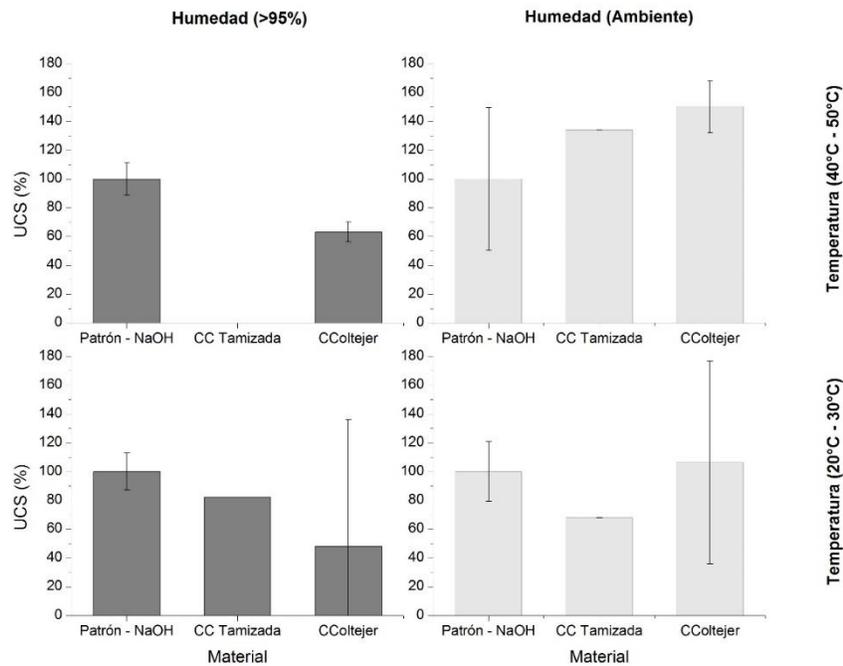
La CC Tamizada obtuvo considerablemente menores resistencias UCS con respecto al suelo patrón con NaOH a 3.5 M y CColtejer en todas las condiciones de curado.

Se tiene un intervalo de confianza muy alto en la CC Tamizada en todas las condiciones de curado para la Arcilla evaluada.

7.3.3. URRAO

En la Gráfica 22 se presenta el análisis de los resultados obtenidos de Urrao a las diferentes condiciones de curado y tipo de mezcla. Las gráficas de CC tamizada y CColtejer se presentan en porcentaje con respecto a la gráfica patrón de NaOH, siendo ésta el 100%.

Gráfica 22: Urrao – NaOH vs CC vs CColtejer – 3.5M (NaOH)



Se observa que el uso de CC tamizada y CColtejer tiene un efecto negativo en el suelo de Urrao cuando se tiene unas condiciones de Humedad (>95%) – Temperatura (40°C – 50°C), siendo los porcentajes con respecto al suelo patrón con NaOH a 3.5 M de 0% con CC Tamizada y 63% con CColtejer.

Se tiene un intervalo de confianza muy alto en la CC Tamizada en todas las condiciones de curado en el suelo de Urrao evaluado.

7.3.4. URRAO – CCOLTEJER Vs CEMENTO PÓRTLAND

Los resultados mostraron que las mezclas con CColtejer obtuvieron mayor resistencia en las dosificaciones de 7% y 30% con respecto a las mezclas de cemento Pórtland en dosificación de 7%, demostrando que al aumentar la molaridad de la solución activadora con NaOH aumentan los resultados de los ensayos UCS. Además las muestras con 30% de CColtejer mostraron tener una mayor resistencia al compararse con las muestras de 7% de CColtejer, comprobando que a mayores dosificaciones de ceniza de carbón se obtienen resistencias UCS más altas.

8. CONCLUSIONES

La Arenilla no obtuvo resultados satisfactorios al ser combinada con CC en ninguna condición, pero si obtuvo mejores resultados al utilizarse CColtejer y los mejores resultados se dieron cuando se usó una temperatura entre 40°C y 50°C en las dos condiciones de humedad, llegando al orden de 350 kPa, siendo un resultado muy satisfactorio para un ensayo UCS en un suelo arenoso ya que

las propiedades fueron favorecidas en 600%, lo que afirma la presencia de material cementante por efecto de la reacción hidróxido de sodio (3.5M) – ceniza.

Las mezclas de Arcilla con CC con concentraciones de NaOH de 3.5 M obtuvieron las mejores condiciones a una humedad mayor al 95% cuando se someten a una temperatura entre 40°C y 50°C, llegando al orden de 270 kPa, sin embargo, al compararse los resultados patrón con NaOH vs CC Tamizada vs CColtejer, se observa que el uso de CC tiene un efecto negativo en todas las condiciones de curado, por lo que se recomienda realizar estudios con mayores dosificaciones de CC, realizar un tamizaje por una malla mayor para filtrar la cantidad de inquemados y usar mayores molaridades para lograr mejorar la resistencia UCS del suelo.

Las mezclas del suelo de Urrao con CC con concentraciones de NaOH de 3.5 M obtuvieron las mejores condiciones a humedades mayores al 95% cuando se someten a una temperatura entre 40°C y 50°C, llegando al orden de 240 kPa, pero a una humedad ambiente las mejores condiciones se dieron cuando el suelo se somete a una temperatura entre 20°C y 30°C, llegando al orden de 150 kPa. En las dos condiciones de humedad se dio como resultado que a mayor adición de CC la resistencia UCS disminuía.

Los resultados obtenidos de CC Tamizada comparados con CColtejer en las Gráficas 20, 21 y 22 muestran que la resistencia media de las muestras de suelo de Urrao con CC Tamizada no está muy alejada de las muestras con CColtejer, y es posible alcanzar una resistencia semejante al realizar un tamizado por una malla tipo N°100 o mayor, de este modo es posible obtener unas propiedades de CC Tamizada y CColtejer comparables, y como se demostró en la Tabla 34, es posible alcanzar la resistencia requerida por la norma INVIAS para suelo – cemento al usarse NaOH en solución como activador alcalino a 8 M.

Para que la CC obtenga una resistencia mínima comparable con la norma INVIAS Artículo 350.4.1 debe cumplir con que:

- La CC para mezclarse con los suelos de arenilla, arcilla y Urrao debe ser tamizada por malla N°100 o mayor y usar hidróxido de sodio en solución como activador alcalino con una molaridad cercana a 8.

Las condiciones más favorables para cada tipo de suelo basándose en la media obtenida de los ensayos UCS con una dosificación de 14% de CC son:

- Arenilla: Curado a una humedad ambiente y una temperatura entre 40°C – 50°C.
- Arcilla: Curado a una humedad mayor a 95% y una temperatura entre 40°C – 50°C
- Urrao: Curado a una humedad ambiente y una temperatura entre 40°C – 50°C

El no uso de las condiciones más favorables no significa que no se logre la resistencia mínima requerida por la norma INVIAS, solo se indica en que condiciones se obtienen las mayores resistencias a la compresión para este tipo de ceniza de carbón.

Inicialmente se creía que el tamaño de partícula era el factor que más afectaba en la resistencia de los suelos evaluados, pero al realizar las mezclas de CC Tamizada y CColtejer se pudo concluir que el factor de mayor influencia en la resistencia a la compresión fue la concentración del hidróxido de sodio, debido a que la molaridad utilizada no era suficiente para lograr un buen material cementante; como se mostró en la Tabla 34 al usar la solución activadora con 8 M, se lograron obtener resistencias de 3880 kN, aumentando en 527% con respecto a las muestras con cemento Pórtland, logrando ser comparable con la norma INVIAS Artículo - 350.4.1 para muestras de suelo – cemento.

AGRADECIMIENTOS

Mis asesores Gloria Isabel y Yhan Paul han sido de gran ayuda y apoyo para completar esta investigación, también agradezco al equipo de trabajo, las personas que me ofrecieron su ayuda en el laboratorio e investigación, al centro de laboratorios de la Universidad de Medellín y al proyecto Red INNOVIAL por su financiación.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Antunes Boca Santa, R. a., Bernardin, A. M., Riella, H. G., & Kuhnen, N. C. (2013). Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge. *Journal of Cleaner Production*, 57, 302–307. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.017
- Arias Jaramillo, Y. P. (2013). *Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón*. Universidad Nacional de Colombia.
- Arjunan, P., Silsbee, M. R., & Roy, D. M. (2001). Chemical Activation of Low Calcium Fly Ash Part II : Effect of Mineralogical Composition on Alkali Activation. *Center for Applied Energy Research*, 1–8.
- Asi, I. M. (2001). Stabilization of Sebkhia Soil Using Foamed Asphalt. *Materials in Civil Engineering*, 13(October), 325–331.
- Bogotá, A. M. de. (2005). Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos.
- Cedex. (2011). FICHA TÉCNICA: CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS (España). Retrieved from <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/305.pdf>
- Chen, W., & Brouwers, H. J. H. (2006). The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *Journal of Materials Science*, 42(2), 428–443. doi:10.1007/s10853-006-0873-2
- Choobbasti, a. J., Ghodrat, H., Vahdatirad, M. J., Firouzian, S., Barari, a., Torabi, M., & Bagherian, a. (2010). Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime. *Frontiers of Earth Science in China*, 4(4), 471–480. doi:10.1007/s11707-010-0138-x
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D., & Silva, R. (2012). Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727–735. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037
- Das, B. (n.d.). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. PWS Publishing.
- Das, B. (1999). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Ed. Thomson Learning. México D.F (primera ed.).
- Das, B. (2008). *Advanced Soil Mechanics* (p. 594).
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, a., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, a., & Deventer, J. S. J. (2006). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z

- Eisazadeh, A., Kassim, K. A., & Nur, H. (2011). Stabilization of tropical kaolin soil with phosphoric acid and lime. *Natural Hazards*, 61(3), 931–942. doi:10.1007/s11069-011-9941-2
- Energía, M. de M. y. (2006). *Mercado Nacional e Internacional del Carbón Colombiano*. (preprensa e impresión: I. L. Diseño, Ed.) (1st ed., p. 114). Bogota: UPME (Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía República de Colombia).
- Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras - Sección 3.4. (2007). Colombia: Instituto Nacional de Vías y Transporte. Retrieved from <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- FEDESARROLLO. (2013). *Indicadores del sector transporte en Colombia* (p. 234). Colombia. Retrieved from <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/Indicadores-del-sector-transporte-en-Colombia-Informe-Consolidado.pdf>
- Fernández-Jiménez, a, & Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82(18), 2259–2265. doi:10.1016/S0016-2361(03)00194-7
- Fernández-Jiménez, a., Monzó, M., Vicent, M., Barba, a., & Palomo, a. (2008). Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous and Mesoporous Materials*, 108(1-3), 41–49. doi:10.1016/j.micromeso.2007.03.024
- Fernández-Jiménez, a., Palomo, a., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204–1209. doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.021
- García-Lodeiro, I., Palomo, a., & Fernández-Jiménez, a. (2007). Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 175–183. doi:10.1016/j.cemconres.2006.11.002
- Haneefa, K. M., Santhanam, M., & Parida, F. C. (2013). Performance characterization of geopolymer composites for hot sodium exposed sacrificial layer in fast breeder reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 265, 542–553. doi:10.1016/j.nucengdes.2013.09.004
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE.
- Iyengar, S. R., Ph, D., Masad, E., Asce, F., Rodriguez, A. K., Bazzi, H. S., ... Hanley, H. J. M. (2013). Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance, (April), 472–483. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000612.
- Jhon L. Provis, Grant C. Lukey, and J. S. J. van D. (2005). Do eopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolite? A Reexamination of Existing Results. *Chem. Mater*, 17, 3075–3085.

- Jofré, C., & Kraemer, C. (2008). Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. España: IECA, ANCADE, ANTER, U.P.V., GIASA, CEMOSA, Ayensa. Retrieved from <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf?iframe=true>
- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986–991. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001
- MINTRANSPORTE. (2011). Diagnostico del Transporte. Ministerio de Transporte.
- Montes, C., & Allouche, E. N. (2012). Influence of Activator Solution Formulation on Fresh and Hardened Properties of Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Coal Combustion and Gasification Products*, 1–9. doi:10.4177/CCGP-D-11-00017.1
- Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (p. 1029).
- Nacional Lime Association. (2004). *MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL: ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL* (Vol. 2004, pp. 1–42). USA. Retrieved from http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf
- Navy, U. S. (1982). Soil Mechanics -- NAVFAC DM 7.01. Retrieved from vulcanhammer.net
- Nescu, I. C. Ȃ. T. Ȃ., Georgescu, M., & Melinescu, A. (2012). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF GEOPOLYMER BINDERS FROM FLY ASH, 74, 3–14.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1315–1322. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019
- Petermann, J. C., & Saeed, A. (2012). ALKALI-ACTIVATED GEOPOLYMERS: A LITERATURE REVIEW. *Air Force Research Laboratory*, (February), 1–99.
- Puppala, A. J., Griffin, J. A., Hoyos, L. R., & Chomtid, S. (2004). Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induced Soil Heave, (April), 391–402.
- R.E, G. (1953). *Clay Mineralogy. Soil Science* (Vol. 76, p. 412). New York: McGraw-Hill. doi:10.1097/00010694-195310000-00009
- Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). (2006). Unión Europea: Diario Oficial de la Unión Europea.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47(2013), 409–418. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069

- Sabat, A. K. (2012). Stabilization of Expansive Soil Using Waste Ceramic Dust. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 1–12. Retrieved from <http://www.ejge.com/2012/Ppr12.369alr.pdf>
- Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. a., & Benson, C. H. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376. doi:10.1016/j.resconrec.2005.08.005
- Sharma, N. K., Swain, S. K., & Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197–1205. doi:10.1007/s10706-012-9532-3
- Shi, C., Jiménez, a. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.016
- Skvara, F., Jilek, T., & Kopecky, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash.
- Sobhan, K., & Mashnad, M. (2003). Mechanical Stabilization of Cemented Soil – Fly Ash Mixtures with Recycled Plastic Strips. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, (October), 943–947.
- Song, X. (2007). Development and Performance of Class F Fly Ash Based Geopolymer Concretes against Sulphuric Acid Attack.
- Termwiki. (2014). Retrieved from http://es.termwiki.com/EN:blaine_finess
- Valenzuela Herrera, M. E. (2013). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL MEMORIA.
- Universidad de Valparaiso: Grupo de Geotecnia, Escuela de Ingeniería en Construcción (2014). Manual de Laboratorio. Retrieved from http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/compresion_no_confinada.pdf
- Vijaya Rangan, B. (2010). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, (December), 68–106.
- William Lambe, T., & V. Whitman, R. (1991). *Mecánica de Suelos*.
- William, R., Thiery, R. G., Schuller, R. M., & Subway, J. J. (1981). Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts. *ENVIRONMENTAL GEOLOGY NOTES*, 1–78.

- Williams, P. J., Biernacki, J. J., Walker, L. R., Meyer, H. M., Rawn, C. J., & Bai, J. (2002). Microanalysis of alkali-activated fly ash – CH pastes. *Cement and Concrete Research*, 32, 963–972.
- Xie, Z., & Xi, Y. (2001). Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31, 1245–1249.
- Yepes Gaviria, O. N., & Bedoya Montoya, C. M. (2012). *EL BLOQUE DE SUELO CEMENTO (BSC) AL BLOQUE DE SUELO GEOPOLIMERIZADO (BSG)*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.