EVALUACIÓN DE CENIZA DE CARBÓN PARA SU INCORPORACIÓN EN LA FORMULACIÓN DE UN CONCRETO LIVIANO Y BALDOSAS CERÁMICAS

ANA MILENA FLOREZ SALGADO

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

Medellín

2021

EVALUACIÓN DE CENIZA DE CARBÓN PARA SU INCORPORACIÓN EN LA FORMULACIÓN DE UN CONCRETO LIVIANO Y BALDOSAS CERÁMICAS

Ana Milena Florez Salgado

amflorezs@eafit.edu.co

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Asesor: Julián Vidal Valencia

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENERÍA

MAESTRÍA EN INGENIARÍA

Medellín

2021

RESUMEN

Cada año a nivel mundial se acumulan grandes cantidades de cenizas volantes y su desecho se ha convertido en un problema ambiental cada vez mayor. En este trabajo, la ceniza generada en el proceso de atomización de arcillas en la industria cerámica se mezcló en diferentes proporciones en la formulación de un concreto liviano para producir piedra prefabricada para revestir paredes, y en una formulación de pasta en el proceso de producción de baldosas cerámicas BII_b, según la NTC 919. Los prefabricados obtenidos a partir de los concretos adicionados con la CE mostraron una resistencia a la compresión mayor a 15 MPa y absorción menor al 5%, utilizando una ceniza activada mecánicamente con un proceso de molienda. Además, las baldosas cerámicas producidas a partir de CE exhibieron propiedades óptimas después de la sinterización a 1140°C (resistencia a la flexión de 1485,22 N, módulo de rotura de 30,67 MPa, y absorción de agua promedio menor a 10%). Por lo tanto, la ceniza estudiada en esta investigación puede ser aprovechada en la producción de baldosas cerámicas BII_b como adición en la fórmula de la pasta, y como sustitución de cemento en la producción de concreto liviano.

Palabras claves: Ceniza volante, activación mecánica, concreto liviano, baldosas cerámicas, puzolanas

ABSTRACT

Every year worldwide large amounts of fly ash are accumulated and this waste has become a growing environmental problem. In this work, the ash generated in the clay atomization process in the ceramic industry was mixed in different proportions in the formulation of a lightweight concrete to produce prefabricated stone for lining walls, and in a paste formulation in the production process of BIIb ceramic tiles, according to NTC 919. The prefabricated obtained from the concrete added with the CE showed a compressive strength greater than 15 MPa and absorption less than 5%, using an ash mechanically activated with a grinding process. Also, ceramic tiles produced from CE exhibited optimal properties after sintering at 1140°C (flexural strength of 1485.22 N, ruptures modulus of 30.67 MPa, and average water absorption less than 10%). Therefore, the ash studied in this research can be harnessed in the production of BIIb ceramic tiles as an addition in the paste formula, and as a cement substitution in the production of lightweight concrete.

Keywords: Fly ash, mechanical activation, lightweight concrete, ceramic tiles, pozzolanas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7
1. MARCO TEORICO 8
1.1 Puzolanas 9
1.1.1 Adiciones puzolánicas más comunes 10
1.1.1.1 Cenizas volantes 10
1.1.1.2 Metacaolín 11
1.1.1.3 Humo de sílice 12
1.2 Concreto hidráulico 12
1.2.1 Componentes del concreto 13
1.2.1.1 Cemento 13
1.2.1.2 Agregados 14
1.2.1.3 Agua 15
1.2.2 Concreto liviano 16
1.2.3 Adiciones minerales usadas en concreto 17
1.2.3.1 Requisitos físicos y químicos de las puzolanas y cenizas volantes para ser usadas en concreto 18
1.2.3.2 Usos de la ceniza volante en concreto 19
1.3 Cerámica tradicional 20
1.3.1 Materias primas para la cerámica tradicional 20
1.3.1.1 Materias primas plásticas 22
1.3.1.2 Materias primas no plásticas 22
1.3.2 Clasificación de los productos cerámicos tradicionales 23
1.3.2.1 Baldosas cerámicas 24
1.3.3 Uso de cenizas en materiales cerámicos 25
2. OBJETIVOS 26
2.1 Objetivo general 26
2.2 Objetivos específicos 26
3. MATERIALES Y MÉTODOS 27
3.1 Materiales 27
3.2 Equipos y metodología experimental 27

3.3 Procedimientos experimentales 28
3.3.1 Propiedades de la ceniza que sale del proceso de atomización 28
3.3.1.1 Propiedades físicas 28
3.3.1.2 Propiedades químicas 35
3.3.2 Características de los agregados utilizados para hacer las mezclas de concreto 37
3.3.2.1 Distribución granulométrica 38
3.3.2.2 Porcentaje de absorción 39
3.3.2.3 Densidad bulk (peso unitario) 40
3.3.3 Características del cemento y del Fortacret 10 (Metacaolín) 41
3.3.3.1 Validación de Parámetros Físicos y mecánicos del Cemento y el producto Fortacret 10 42
3.3.3.2 Validación de Parámetros químicos del Cemento y el producto Fortacret 10 44
3.3.4 Elaboración de mezclas de concreto y probetas para ensayos 44
3.3.5 Activación mecánica de la ceniza 46
3.3.6 Caracterización de los concretos 47
3.3.6.1 Resistencia a la flexotracción y compresión 47
3.3.6.2 Porcentaje de absorción y Densidad 49
3.3.7 Elaboración de mezclas para pastas cerámicas y probetas para ensayos 50
3.3.7.1 Homogenización de las mezclas 50
3.3.7.2 Conformación de probetas 52
3.3.8 Caracterización de los materiales cerámicos 54
3.3.8.1 Propiedades físicas de probetas cerámicas 54
3.3.8.2 Propiedades mecánicas de probetas cerámicas 56
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 56
4.1 Caracterización de Materias primas 57
4.1.1 Ceniza obtenida del proceso de atomización 57
4.1.1.1 Análisis de granulometría 57
4.1.2 Análisis de morfología por microscopía electrónica de barrido y micro elemental 60
4.1.2.1 62
Caracterización mineralógica por difracción de rayos x (DRX) 62
4.1.2.2 Análisis composicional por fluorescencia de rayos x (FRX) 63
4.1.3 Caracterización de los agregados para mezclas de concreto 65
4.1.4 Parámetros de calidad del cemento 67

4.2 Caracterización de concretos obtenidos a partir de mezclas con adiciones de CE 68
4.2.2 Características de los materiales cerámicos obtenidos a partir de pastas cerámicas con adiciones de CE 73
5. CONCLUSIONES 80
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 83

INTRODUCCIÓN

Las cenizas volantes son residuos resultantes de la combustión del carbón pulverizado, que sale en forma de emisión o cenizas y son captados a través de filtros mecánicos o electrostáticos. Cada año a nivel mundial se acumulan grandes cantidades de cenizas volantes y su desecho se ha convertido en un problema ambiental cada vez mayor (Medina, 2010). Se considera que anualmente se queman más de 830 millones de toneladas de carbón que generan unos 75 millones de toneladas de residuos de combustión formados principalmente por cenizas volantes que contienen carbón sin quemar (inquemados). En Antioquia, según estudio realizado por el Centro de Investigaciones del Carbón en 1996 para 25 empresas consumidoras de carbón, el consumo anual de carbón es de 406.602 toneladas, del cual se obtienen 26.852 toneladas de cenizas volantes aproximadamente, con una cantidad de inquemados totales de 4.852 toneladas (Leonardo Velásquez, 2007).

Alrededor del 20% de las cenizas volantes generadas en el mundo se utilizan en la producción de hormigón, como adición activa, generalmente llamadas puzolanas, las cuales reaccionan con la cal libre del cemento y el agua para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) (Ahmaruzzaman, 2010), mitigando también las emisiones de CO_2, reduciendo el consumo de cemento, ya que para la producción de una tonelada de clinker se generan globalmente de 700 a 1100 kg de CO_2, siendo así la industria cementera responsable de aproximadamente 5% al 7% de las emisiones globales de CO_2 (Felix & Possan, 2018). Otros usos incluyen la recuperación de suelos, la síntesis de zeolita y el uso como relleno en polímeros (Z.T. Yao X.S. Ji, 2015). También se ha estudiado la incorporación de cenizas volantes como un material finamente granular de bajo costo en la industria de las baldosas cerámicas (Luo Y. , Zheng, Ma, Liu, & Wang, 2017), el cual es uno de los materiales de construcción de uso más frecuente, alcanzando solo en China, los 2 mil millones de metros cuadrados

anualmente, requiriendo un gran número de materias primas. Por ejemplo, para hacer 1 m^2 de baldosas se necesitan 20 kg de materias primas, por lo que ante la escasez de materias primas de alta calidad y el costo creciente, es urgente buscar materias primas alternativas con alta disponibilidad (Ji, Zhang, Yan, Zhu, & Li, 2016).

Actualmente la mayoría de las cenizas de la quema de carbón provienen por lo general de las centrales térmicas de alta temperatura y las centrales térmicas de combustión seca, donde el 90% de ceniza generada está constituida por partículas finas recolectadas en los precipitadores electrostáticos (Camilo Chávez, 2015). Por el contrario, las cenizas de carbón generadas en los procesos de atomización de arcillas son de baja finura, alto contenido de humedad y por lo general traen consigo gran cantidad de arcilla quemada, por lo que podrían requerir pretratamientos para su incorporación tanto en concreto como en la pasta para la producción de cerámica. Así pues, en este trabajo se pretende estudiar la incorporación de una ceniza, generada en el proceso de atomización de arcillas en la industria cerámica, en la formulación de un concreto liviano para producir piedra prefabricada para revestir paredes, y el aumento del porcentaje de la misma en una formulación de pasta en el proceso de producción de baldosas cerámicas BII_b, según la NTC 919, encontrando las condiciones óptimas, tanto físicas como químicas, de este material para poder ser incorporado.

1. MARCO TEORICO

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica sobre los diferentes materiales con propiedades cementantes o puzolánicas utilizados para el concreto, donde se resalta el uso de las cenizas que provienen de la quema de carbón. Adicionalmente, se recopiló información acerca de

los tipos de materiales cerámicos, en especial los basados en cerámica tradicional, las materias primas para la fabricación de soportes cerámicos para para pisos y paredes, y la inclusión de aditivos minerales como la ceniza volante en su producción. Además, se abordan aspectos relacionados con la normatividad sobre el uso de este tipo de materiales en el hormigón de cemento Portland y las propiedades físicas y mecánicas que se exigen para los pisos

1.1 Puzolanas

Las puzolanas son materiales, cuyo origen e historia proviene del uso de las cenizas volcánicas en la población de pozzuoli en Italia, donde ya eran explotadas en tiempos de los romanos (Suárez A., 2010). Según la *American Society for testing and Materials* (ASTM), se definen como material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (ASTM International, 2012).

Estos materiales se dividen, según su origen, en dos grandes grupos naturales y artificiales. Las puzolanas naturales son producto de la transformación del polvo y "cenizas" volcánicas que por acción atmosférica (meteorización) se convirtieron en rocas volcánicas, más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza, o pueden ser rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas) de origen submarino. Por otro lado, las puzolanas artificiales son todos aquellos materiales naturales o subproductos de determinadas operaciones industriales, que deben su condición a un tratamiento térmico. En general, la gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de

la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de grupos como SiO_4 y AlO_4 (Calleja, 1968).

Las puzolanas se utilizaron originalmente en hormigones y morteros debido a su reacción con el Ca (OH) 2 liberado durante la hidratación del cemento. El Ca (OH) 2 susceptible al ataque químico se reduce, y en su lugar se forma el gel CSH y otros productos que aumentan la durabilidad del hormigón (Braz, y otros, 2017).

1.1.1 Adiciones puzolánicas más comunes

1.1.1.1 Cenizas volantes

Las cenizas representan los residuos sólidos de la combustión del carbón, originados principalmente por la materia mineral. Por tanto, sus características dependen de la naturaleza de la materia mineral y de las condiciones a las cuales ocurre la oxidación del carbón. Las cenizas dependiendo de las condiciones de combustión, pueden clasificarse como (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín):

- Cenizas de fondo (Bottom-Ash), conformadas por partículas pesadas de diámetro entre 0.07- 40 mm.
- Cenizas volantes (Fly-Ash), constituidas por partículas que fueron arrastradas por los gases de combustión y quedaron atrapadas en colectores mecánicos o en precipitadores electrostáticos.
- Cenizas en fase gaseosa, representadas por minerales volatilizados durante la combustión, y que se pueden condensar sobre las partículas de cenizas volantes o de fondo y sobre superficies frías.

La ceniza volante es un material heterogéneo compuesto de partículas amorfas y cristalinas, compuestas, independientemente de donde provengan, de mullita, cuarzo, hematita (Fe2O3), magnetita (Fe O), anhidrita (CaSO4), nefelinas, piroxenos y anortitas en su fase cristalina, y en su

fase amorfa por estructuras de silicio, aluminio, calcio, magnesio, sodio y hierro (Guerrero & Chaves, 2013).

A altas temperaturas, generalmente 750 ° C, se producen reacciones involucrando los minerales en las brasas. Del grupo de minerales mayores, solo el cuarzo no se altera significativamente durante la incineración a alta temperatura, por lo que la cantidad y composición de las cenizas resultantes difieren considerablemente de las de los materiales inorgánicos originalmente asociados al carbón puro (Speight, 2005).

Sin embargo, uno de los principales problemas en Colombia para la utilización de cenizas es la baja calidad, debido especialmente a la presencia de altos contenidos de carbón (inquemado)los cuales son importantes debido a sus propiedades fisicoquímicas peculiares, que también pueden tener un impacto, por ejemplo, en la incorporación de aire en las mezclas en la producción de hormigón y la alteración del hormigón con el tiempo (Suárez I., 2017).

1.1.1.2 Metacaolín

El tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la obtención de Metacaolín ($2SiO_2.Al_2O_3$) o Mullita ($3Al_2O_3.2SiO_2$). De estos productos, el Metacaolín (MK), es un aluminosilicato de carácter amorfo y alta reactividad clasificado como una puzolana clase N, que mezclado con cal o cemento actúa como puzolana y les concede a los morteros y concretos excelentes propiedades cuando se adiciona al cemento, tal como una resistencia a la compresión superior y excelentes propiedades de durabilidad (Torres J, 2011).

El MK reacciona con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento para formar C_2S secundario, el cual posteriormente forma el gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, el silicoaluminato bicalcico hidratado (gehlenita) y en algunas ocasiones hidrogranates (hydrogarnet), que contribuyen con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto incrementando las propiedades mecánicas especialmente a edades temprana, la

resistencia al ataque de sulfatos, de la resistencia a la reacción álcali-sílice (ASR), el refinamiento de poros, y disminuyendo la permeabilidad, la corrosión del refuerzo, la evolución del calor de hidratación (Restrepo .J, 2006). Sin embargo, el uso de metacaolín tiene inconveniente que se basan en el requisito de mineral de caolín puro y los altos costos energéticos involucrados en el proceso de producción (Castillo, Antoni, Alujas, Scrivener, & Martirena, 2011).

1.1.1.3 Humo de sílice

Los materiales puzolánicos como la ceniza volante y el humo de sílice, resultan ser beneficiosos en la producción de concreto al reaccionar químicamente con la portlandita (hidróxido de calcio), lo que resulta en la formación de C-S-H adicional, densificando y reduciendo la porosidad de la matriz (Moffatt & Thomas, 2018), contribuyendo así a una mayor resistencia temprana (Chysanthi & Stefanidou, 2018). Además, este material puede desempeñarse como relleno debido a su finura, llenando los vacíos entre las partículas más grandes de cemento, lo cual contribuye también a la densificación de la pasta de cemento y a la zona de transición interfacial, produciendo una microestructura más densa, con una menor proporción de vacíos (Hermann, Langaro, Lopes, & Klein, 2016). Uno de los principales problemas del humo de sílice es la tendencia de las partículas a aglomerarse, debido a su alta energía (Chysanthi & Stefanidou, 2018)

1.2 Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es uno de los materiales más utilizados para la construcción, tanto para el desarrollo urbano como para la infraestructura de un país, gracias a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener; sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural; y su economía (Guerrero & Chaves, 2013). Constituido por diferentes materiales como agua, cemento y agregados que, dosificados y mezclados adecuadamente, se integran para formar elementos monolíticos que proporcionan resistencia y durabilidad en las

estructuras (Guerrero & Chaves, 2013). Las proporciones del concreto deben seleccionarse en tal forma, que el producto resultante cumpla con los requisitos de colocación adecuada para cada tipo de obra, con la resistencia, durabilidad, economía y peso unitario exigidos como requisitos mínimos a cumplir por el hormigón diseñado (Giraldo, 1987).

1.2.1 Componentes del concreto

1.2.1.1 Cemento

Antiguamente se utilizaron materiales cementantes como el yeso, la cal común e hidráulica y mezclas de cal con ceniza volcánica, hasta el año 1824, cuando inicia la era del cemento patentándose el Cemento Portland, el cual evoluciona finalmente en 1845 cuando el inglés Isaac Jhonson le da a la mezcla la temperatura adecuada para formar el Clinker, producto que después de molido ofrece óptima calidad como cementante y es el que actualmente se usa. El Clinker resulta de la calcinación hasta una fusión incipiente de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos, y el cemento portland, el cual se obtiene de la mezcla del clinker con yeso, se compone esencialmente de silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, ferroaluminato tetracálcico, yeso natural y óxidos menores de Ca, Mg, Na, K, Mn, Ti, P, Fe (Gutiérrez de López, 2003). Al mezclar el cemento con el agua, se forma una pasta en estado plástico, que después adquiere rigidez.

Aunque el cemento Pórtland ha contribuido sustancialmente al desarrollo económico de la sociedad moderna, su fabricación sustentada en el uso de recursos no renovables ha generado la producción de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, y a fin de tener similares niveles de consumo de energía y emisiones en el 2014 que los actuales, la industria cementera está obligada a reducir las emisiones en un 50%. Las soluciones planteadas hasta el momento para este problema, incluye reducir el consumo de petróleo durante la producción de cemento y reducir la producción de

Clinker, lo cual incluye la reducción de cantidades de cemento Pórtland como material aglomerante para la confección del hormigón (Dopico, y otros, 2008).

1.2.1.2 Agregados

Los agregados, son materiales de forma granular e inertes que, aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua, forman un mortero o concreto. Estos se pueden clasificar según su procedencia (natural o artificial), densidad (pesado a ultraligero), tamaño (grueso o fino), forma y textura (Rivera).

1.2.1.2.1 Agregados gruesos y finos

Los agregados se pueden clasificar según su tamaño como gruesos o finos, dependiendo del diámetro medio de sus partículas, llamando grueso a la fracción retenida en una malla N°4 y fino a lo que pasa esta malla, pero que es retenida por una N°200 (Torres, 2014).

1.2.1.2.2 Agregados livianos

La construcción da cada vez más importancia a los hormigones preparados con áridos ligeros. De hecho, estos materiales permiten, suponiéndoles unas resistencias mecánicas suficientes, sustituir los elementos del hormigón pesado por otros que, a igualdad de espesor, proporcionan un aislamiento térmico muy superior (Cubaud & Murat, 1969). La NTC 4045 menciona dos tipos generales de agregados livianos; el primero son los agregados procesados como las escorias de alto horno, arcillas expandidas, pizarras etc, obtenidos por expansión, paletización o sinterización; el segundo tipo son los que se encuentran en estado natural, como la piedra pómez (Norma Técnica Colombiana, 2019). En la Tabla 1 y 2 se muestran los requisitos químicos y físicos para los agregados livianos usados para concreto estructural.

Tabla 1. Parámetro químico para agregados livianos usados para concreto estructural

Parámetro	Límites permisibles
Pérdida por ignición	Máx. 5%

Tabla 2. Parámetros físicos para agregados livianos usados para concreto estructural

Parámetro	Límites permisibles
Terrones de arcilla	Máx. 2% en masa seca
Masa unitaria agregado fino	Máx. 1120 kg/m^3 masa suelta seca
Masa unitaria agregado grueso	Máx. 880 kg/m^3 masa suelta seca
Agregados finos y combinados	Máx. 1040 kg/m^3 masa suelta seca

1.2.1.3 Agua

El agua en una mezcla de concreto cumple dos funciones básicas, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable (Rivera). Para la fabricación del concreto, el agua deberá ser limpia, fresca y libre de materia orgánica e inorgánica, ácidos y álcalis, suspensión o solución, y de cualquier sustancia que pueda causar efectos adversos en el concreto, en cantidad tal que puedan afectar la calidad y durabilidad del concreto. La norma NTC 3459 define los requisitos químicos para el agua usada en la elaboración de concretos (Norma Técnica Colombiana, 2001).

Tabla 3. Límites de impurezas permitidos al agua usada en concretos

Tipo de Impureza	Valor máximo recomendado
Iones combinados de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarobonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato	2000 ppm

Cloruros	1000 ppm
Ión sulfato (SO4)	3000 ppm
Carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio	1000 ppm
Sólidos totales	0,05 kg/l

1.2.2 Concreto liviano

El concreto ligero, ha sido conocido como un concreto con una densidad máximo de 1600 kg/m^3. Producido a partir de agregados livianos, la característica más evidente del concreto ligero es la densidad que con frecuencia es solo una fracción de la densidad del concreto normal, desarrollando por ende una resistencia mecánica a la compresión menor a la del concreto convencional. A su vez, el concreto liviano posee propiedades de aislamiento térmico y acústico, ya que al ser más poroso encierra cantidades considerables de aire que dificultan el paso del calor y el sonido a través del material (Álvarez, Evaluación de la densidad y la resistencia a la compresión de bloques de concreto con sustitución del agregado de piedra por desechos de la industria del papel, 2014).

Por su parte, el comité ACI 213 (1999), define al hormigón liviano estructural como aquel hormigón con una densidad menor que 1850 kg/m^3 y resistencia superior a 17.2 MPa (Videla & Tapia, 2007). Sin embargo, para el caso de algunos prefabricados como piedra para enchape, hechas en concreto, la ASTM permite resistencias en promedio mínimas de 15 MPa a los 29 días de curado, con ningún espécimen con un valor inferior a 12 MPa (American Society Standard for Materials and Testing, 2016), por lo que, dependiendo del caso, el concreto liviano deberá tener resistencias a la compresión distintas.

1.2.3 Adiciones minerales usadas en concreto

En el mundo de los concretos, el termino de adiciones minerales se refiere a los materiales inorgánicos amorfos y/o vítreos y cristalinos, naturales o artificiales que incorporados al cemento portland (CP) en cantidades apropiadas son capaces de generar los mismos productos amorfos y/o vítreos de hidratación que el propio CP (Trusilewicz, 2014). Estos materiales suplementarios son ampliamente utilizados en el hormigón y pueden ser cementantes, rellenos o puzolánicos. Sus efectos sobre las reacciones cinéticas son complejos debido a sus interacciones con las fases del Clinker, pero en las primeras etapas, el efecto relleno es dominante, lo que aumenta la velocidad de las reacciones de la fase de Clinker debido a la nucleación (Braz, y otros, 2017).

Dentro de estas adiciones se destacan principalmente las adiciones activas, que bien sea por hidraulicidad propia o por su reacción con la portlandita obtenida durante la hidratación del cemento, forman silicatos y aluminatos de calcio hidratados, y de las cuales las más usadas en concreto para sustitución parcial del cemento son las escorias siderúrgicas: básicas y ácidas, de alto horno o de hornos eléctricos; cenizas volantes: pobres o ricas en CaO; y puzolanas: Tobas volcánicas, rocas vítreas volcánicas, puzolanas altas en sílice o puzolanas artificiales (Carvajal, 2012).

La norma ASTM C618 (ASTM International, 2017) clasifica por su origen las puzolanas y cenizas volantes, utilizadas como aditivos minerales en el concreto, de la siguiente manera: Clase-N: Puzolanas naturales o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como se indica en esta norma, tales como algunas tierras de diatomáceas; opalinos y esquistos; tobas y cenizas volcánicas o pumitas, calcinadas o sin calcinar; o diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras. Clase F: Ceniza volante que cumple con los requisitos aplicables para esta clase y que se dan en esta norma. Esta

clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas y se produce típicamente a partir de la quema de antracita o carbón bituminoso, pero también se puede producir a partir de carbón sub bituminoso y de lignito. Y por último la ceniza volante Clase C, que cumple con los requisitos aplicables para esta clase, y además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementantes. Este tipo de ceniza generalmente se produce a partir de la combustión de lignito o carbón sub bituminoso, pero también puede producirse a partir de antracita o carbón bituminoso.

1.2.3.1 Requisitos físicos y químicos de las puzolanas y cenizas volantes para ser usadas en concreto

Las normas ASTM C 618 y NTC 3493 definen los requisitos físicos y químicos de las cenizas volantes, para su uso en el hormigón de cemento Portland. La norma ASTM C 311 incluye los métodos para el análisis químico y las pruebas físicas (Camilo Chávez, 2015). En la Tabla 4 y 5 se muestran los requisitos físicos y químicos de este tipo de materiales para poder ser usados como adición en concreto

Tabla 4. Requisitos físicos de las cenizas volantes y puzolanas (NTC 3493, 2017)

Requisito	Clase		
	N	F	C
% máx Retenido sobre tamiz N° 325	34,0	34,0	50,0
% min Índice de actividad de resistencia con respecto al control a los 7 días	75,0	75,0	75,0
% min Índice de actividad de resistencia con respecto al control a los 28 días	75,0	75,0	75,0
% máx Requerimiento de agua con respecto al control	115,0	105,0	105,0
% máx Expansión o contracción en autoclave	0,8	0,8	0,8

Tabla 5. Requisitos químicos de las cenizas volantes y puzolanas (NTC 3493, 2017)

Requisito	Clase		
	N	F	C
% min. $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	70,0	70,0	50,0
% máx. SO_3	4,0	5,0	5,0
% máx. Contenido de humedad	3,0	3,0	3,0
% máx. Pérdidas por ignición	10,0	6,0	6,0

1.2.3.2 Usos de la ceniza volante en concreto

Las cenizas volantes se pueden almacenar en las centrales eléctricas de carbón, o pueden ser depositados en vertederos que resultan en costos de gestión adicionales y un impacto ambiental negativo. Por este motivo, la mejor solución es ser reutilizada, por lo que se ha aplicado en muchos campos como el cemento (cemento portland) y la industria del hormigón, industria de ladrillos (Consoli N., 2014), plantas de asfalto y hormigón, tratamiento de residuos, estabilización de suelos (Suárez I., 2017), y geopolímeros (Toniolo N., 2017), entre otros.

Para su uso en hormigón, donde generalmente la cantidad de ceniza volante varía de 15% a 30% del peso del cemento (Gang Xu, 2018), se ha estudiado la influencia de estas en las propiedades de durabilidad, obteniéndose con la inclusión de ceniza, una reducción en la porosidad del hormigón y por ende una menor absorción de agua y permeabilidad al cloruro, así como también una reducción en la contracción por secado con el incremento del contenido de cenizas volantes en la mezcla (Saha, 2018). Se ha encontrado también una mejora significativa en las propiedades de resistencia y la resistencia a la fractura del hormigón maduro, mediante la inclusión de un 20% de ceniza volante clase F como reemplazo parcial de cemento portland ordinario (Golewski G. L., 2018), influenciando la microestructura del concreto, especialmente su porosidad (Gao Y., 2018). Además, se ha estudiado la sinergia entre cenizas volante y otros materiales puzolánicos como el metacaolín, en la

que utilizando una proporción de cemento: metacaolín: ceniza volante de 80:10:10 respectivamente, mejora significativamente la trabajabilidad del concreto fresco y produce una mezcla más uniforme, una microestructura más densa y un mejor rendimiento del concreto endurecido (S. Sujjavanich, 2017), o en combinación con humo de sílice en cementos de fosfato de potasio y magnesio (MKPC), donde mejora la resistencia al agua del MKPC debido a sus efectos físico en la optimización de la estructura del poro (Liwu Mo, 2018).

1.3 Cerámica tradicional

La "cerámica tradicional" es aquella hecha a partir de materias primas naturales, que de acuerdo con su función pueden ser plásticas (arcillas) o no plásticas como el caso de "desgrasantes" (materiales que reducen la plasticidad permitiendo una mejor trabajabilidad y facilitando el secado), o elementos "fundentes" (que facilitan una cocción a menor temperatura e introducen los elementos necesarios para la formación de nuevas fases). Son cerámicas tradicionales la cerámica estructural (ladrillos, tejas, termoarcillas, clinkers y otros), la loza, la porcelana de mesa y artística, la cerámica sanitaria, los pavimentos y revestimientos, los esmaltes y fritas, y los refractarios (Crespo, 2015).

1.3.1 Materias primas para la cerámica tradicional

En general las materias primas cerámicas mayormente utilizadas son silicatos y rocas silicatadas. Los principales minerales que entran en composiciones cerámicas son: cuarzo, feldespatos, nefelina, talco, magnesita, olivino, serpentina, sepiolita, vermiculita, wollastonita, cromita, grafito, andalucita/sillimanita/distena, cordierita, pirofilita, minerales de Li y B, zircón (Tabla 6) (Galán & Aparicio).

Tabla 6. Principales minerales utilizado como materia prima cerámica (Galán & Aparicio)

	Minerales	Fórmulas	Tipos de yacimientos frecuentes
Formas de sílice	Cuarzo	SiO2	Cuarcitas, areniscas, diques de cuarzo, vidrios volcánicos. Sedimentos de precipitación química
Feldespatos	Ortoclasa Microlina Plagioclasas	KSi3O3Al Na Si3O8Al (Albita) Ca Si2O8Al2 (Anortita)	Pegmatitas. Arenas de descomposición de granitos y gneises
Neosilicatos alumínicos y otros minerales de aluminio	Andalucita Silimanita Distena	Al2OSiO4	Aureolas de metamorfismos de rocas ígneas en sedimentos arcillosos. Gneises. Esquistos y pegmatitas
	Corindón	γ-Al2O3	Pegmatitas pobres en sílice. Rocas ricas en Al metamorfizadas
	Pirofilita	Al2Si4O10(OH)2	Pizarras aluminicas de metaformismo regional bajo
Silicatos Magnésicos y otros minerales de Mg	Olivino	Mg2 SiO4 (forsterita)	Rocas ultrabásicas
	Talco	Mg3 Si4 O10 (OH)2	Dolomías silicíficadas. Serpentinas y olivinos alterados. Ambientes metasomáticos, hidrotermal y de metaformismo regional
	Cordierita	Mg2 Si5 AlO18 Al3	Rocas de Mg y Al fuertemente metamorfizadas. Esquistos y gneises inyectados rocas ígneas
	Magnesita	Mg CO3	Series carbonatadas metamorfizadas. Asociada serpentina. Mármoles

	Vermiculita	(Mg,Fe,Al)3 (Si,Al)4 O10 (OH)2-4H2O	Pegmatitas máficas. En serpentinas. Alteración de biotitas
	Sepiolita	SiO12 O30 (OH)4Mg8-4H2O	Rocas básicas y serpentinitas alteradas. Cuencas sedimentarias continentales básicas
Otros minerales	Wollastonita	Ca SiO3	Calizas impuras metamorfizadas
	Grafito	C	Rocas carbonosas metamorfizadas por alta temperatura
	Zircón	Zr SiO4	Placeres. Accesorios en rocas plutónicas y metamórficas ácidas
	Cromita	Fe Cr2 O4	Rocas ultrabásicas. Placeres

1.3.1.1 Materias primas plásticas

La arcilla es una roca sedimentaria formada por partículas muy finas (>50% es <2µm), que mezclada con agua es plástica, endurece con el secado y calor y contiene filosilicatos y otros minerales que le imparte las mismas propiedades (minerales de la arcilla) (Galán & Aparicio). Las arcillas tienen otros minerales diferentes de los anteriores, que se denominan minerales asociados (cuarzo, feldespatos, calcita, pirita) y ciertas fases asociadas no cristalinas, que pueden o no impartir plasticidad, y la materia orgánica (Galán & Aparicio). Las arcillas comunes y su papel en la preparación del cuerpo cerámico son múltiples y consisten en: impartir la plasticidad necesaria para su moldeo, mejorar las propiedades mecánicas, mejorar las propiedades de la suspensión, y aportar los componentes para la formación de fases líquidas y cristalinas durante la cocción (Galán & Aparicio).

1.3.1.2 Materias primas no plásticas

Componentes para la formación de fases líquidas y cristalinas durante la cocción. Las materias primas no plásticas reducen la plasticidad y facilitan la desfloculación, mejoran la permeabilidad y empaquetamiento de la pasta, y aportan óxidos para la formación de fases líquidas y cristalinas o son inertes. Los principales minerales no plásticos son: feldespatos (y feldespatoides) que son

fundentes; cuarzo y arenas silíceas que actúan como inertes; calcita y dolomita, que pueden ser reactivos y también fundentes; y los óxidos de Fe y otros elementos (Cu, Co, Mn, Ti, …) que suelen actuar como pigmentos, y en ciertos casos como fundentes (Galán & Aparicio).

1.3.2 Clasificación de los productos cerámicos tradicionales

La clasificación de los productos cerámicos tradicionales puede basarse en la porosidad, así pues , los productos porosos tienen un 10-20% de absorción de agua y los productos no porosos (vitrificados o gresificados) una absorción de agua inferior al 10%. En cada grupo se pueden distinguir los esmaltados y los no esmaltados, y para cada caso, el color de la pasta (blanca o coloreada). Las materias primas apropiadas para cada tipo de producto son de nuevo las arcillas comunes más o menos coloreadas (en función de la cantidad de carbonatos y de óxidos de hierro), las arcillas blancas, las arcillas refractarias y otras materias primas refractarias (Enrrique & Amorós, 1985).

La materia prima condiciona las características de la pasta y mediante el proceso de fabricación elegido se obtiene un producto con unas propiedades determinadas, que permitirán usos demandados por el mercado. En función del sector pueden demandarse preferentemente ciertas composiciones. Así (Enrrique & Amorós, 1985):

a) Para alfarería: bajo contenido en alúmina (16-23%) y alta proporción de hierro.

- Pobres en carbonato cálcico (0-15%) y ricas en óxidos de hierro (3,5-16%). Color de cocción rojo. Temperatura de cocción: 960° -1040 °C.
- Ricas en carbonato cálcico (>25%)

  Color de cocción blanco o amarillento. Temperatura de cocción: 1000° -1100 °C.

  Azulejos.

b) Para materiales estructurales: Composición química variada, con altos contenidos en sílice y hierro total. Temperatura de cocción: 8500 -1100 °C.

c) Para granulares y gres: Arcillas y pizarras ricas en ilita y caolinita, con cuarzo y feldespatos. Temperatura de cocción: 950°-11 00 °C.

1.3.2.1 Baldosas cerámicas

Según la NTC 919, la baldosa cerámica es una placa delgada hecha de arcilla u otras materias primas inorgánicas, utilizada generalmente como recubrimiento para pisos y paredes, moldeada usualmente por extrusión (A), prensado a temperatura ambiente (B) u otros procesos (C), y que es secada y quemada a la temperatura necesaria para desarrollar las propiedades requeridas. Esta, además puede ser recubierta con esmalte, el cual es un material vidriado impermeable (Norma Técnica Colombiana, 2015). La Tabla 7 muestra la clasificación de las baldosas por grupo, según su absorción de agua (E_b).

Tabla 7. Clasificación de baldosas cerámicas según la NTC 919

Grupo	Absorción de agua	Método de fabricación	Subgrupo
Grupo I (Baldosas de baja absorción)	Eb ≤ 3%	Baldosas extruidas	AIa Eb ≤ 0,5%
			AIb 0,5% < Eb ≤ 3%
		Baldosas prensadas en seco	BIa Eb ≤ 0,5%
			BIb 0,5% < Eb ≤ 3%
Grupo II (Baldosas de absorción media)	3% < Eb ≤ 10%	Baldosas extruidas	AIIa 3% < Eb ≤ 6%
			AIIb 6% < Eb ≤ 10%
		Baldosas prensadas en seco	BIIa 3% < Eb ≤ 6%
			BIIb 6% < Eb ≤ 10%

Grupo III (Baldosas de alta absorción)	Eb > 10%

1.3.3 Uso de cenizas en materiales cerámicos

La expansión de las industrias cerámicas ha dado lugar a una mayor deficiencia en las materias primas cerámicas tradicionales, como la arcilla y el feldespato. La ceniza volante de carbón se ha estudiado como sustituta de estos materiales, dada su similitud en términos de su composición química y física (Zimmer & Bergmann, 2007).

En la producción de baldosas cerámicas se ha estudiado la activación alcalina de la ceniza de carbón con NaOH como pretratamiento, obteniéndose mejores resultados que cuando se utiliza no tratada (Luo Y. , Zheng, Ma, Liu, & Wang, 2017), donde se encontró que a temperaturas de sinterización de 1210ºC conduce a una alta absorción de agua, baja contracción y baja resistencia (Kockal, 2015), así como el uso de un 20% w/w de cenizas fluidizadas en mezclas binarias con arcilla de gres para producir baldosas cerámicas prensadas en seco del grupo BIII según EN 144 (Sokolar & Vodova, 2011) . Además, se logró con éxito sintetizar una base de baldosa cerámica por el proceso de sinterizado cerámico utilizando cenizas volantes con alto contenido de alúmina (Wang, y otros, 2017), también cerámicas para la construcción basadas en cenizas volante de carbón lignito y mezclas de residuos de vidrios, o cenizas de carbón, obtenidas de un proceso de gasificación integrado de ciclo combinado, y arcillas de plasticidad media, logrando disminuir la temperatura de sinterizado a 900 °C , la absorción, saturación y propiedades mecánicas de los cuerpos cocidos, sin efectos negativos (Karayannis, y otros, 2017) (Aineto, Acosta, & Iglesias, 2006). Los resultados también son alentadores en la producción de vitrocerámicas, donde se encontró que las trazas de elementos tóxicos fueron completamente destruidas, y los metales pesados fueron solidificados con

éxito en la matriz de vidrio durante el proceso de vitrificación a alta temperatura (Wang, Zhang, & Chen, 2014), como también reportó Yang Luo y colaboradores en la síntesis de una espuma cerámica a partir de cenizas volantes, donde las pruebas de toxicidad por lixiviación revelaron que los metales pesados peligrosos eran encapsulados dentro de las fases vítreas durante la sinterización (Luo Y. , Zheng, Ma, Liu, & Wang, 2018).

También ha sido ensayada para producir y mejorar la calidad en ladrillos en cuanto resistencia a la compresión, absorción de agua y agrietamiento (Zhang, 2013) (Cultrone & Sebastián, 2009) (Lingling, Wei, Tao, & Nanru, 2005) (Abbas, Saleem, Kazmi, & Munir, 2017), lo cual influye directamente sobre el costo de producción cuando se adicionan grandes volúmenes de ceniza debido a la disminución de energía necesaria para la cocción. Y en el caso de tejas, se utilizó ceniza volante para mejorar la tolerancia al daño y la durabilidad de tejas para techos sometidos a impacto dinámico (Castellanos, Mawson, Burke, & Prabhakar, 2017).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las condiciones físicas y químicas óptimas de la ceniza de carbón, proveniente de procesos de atomización de arcillas, para su incorporación en la formulación de un concreto liviano y una pasta cerámica para baldosas

2.2 Objetivos específicos

- Determinar características físicas y químicas de la ceniza de carbón proveniente del proceso de atomización de arcillas.

- Determinar características físicas y químicas de la formulación del concreto liviano y la pasta cerámica.
- Determinar las condiciones físicas y químicas óptimas de la ceniza para ser incorporado tanto en el concreto como en la pasta cerámica.
- Determinar los porcentajes óptimos de adición de ceniza, tanto en el concreto liviano, como en la pasta cerámica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo se mencionan los materiales y métodos que se utilizaron para este trabajo que incluyen:

3.1 Materiales

- Ceniza resultante de la quema de carbón subbituminoso tipo ripio (CE), utilizado como combustible en el proceso de atomización para el secado de barbotina en la empresa Eurocerámica S.A.
- Cemento uso estructural del Grupo Argos S.A. de la planta Rioclaro
- Fortacret 10 (metacaolín) de la organización Corona.
- Agregado fino pétreo de origen aluvial de distribuidora local.
- Agregado grueso liviano de origen volcánico (Ecuador).
- Arcillas y chamote suministrados por Eurocerámica S.A

3.2 Equipos y metodología experimental

- Determinación de propiedades físicas y química de la ceniza, tales como finura, gravedad específica, granulometría, morfología, análisis mineralógico, porcentaje de

óxidos, porcentaje de humedad y porcentaje de inquemados.

- Verificación de propiedades físicas y químicas del cemento utilizado y el producto Fortacret 10.
- Determinación de las propiedades físicas de los agregados fino y grueso, utilizados para elaborar las mezclas de concreto, como granulometría, densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de absorción.
- Elaboración de probetas de concreto liviano y placas cerámicas con las diferentes mezclas a ensayar, para la determinación de propiedades.
- Determinación de propiedades físicas y químicas de las mezclas de concreto liviano para ensayo, como resistencia a la compresión y flexión, porcentaje de absorción, densidad.
- Determinación de propiedades físicas y químicas de los productos cerámicos elaborados con las diferentes pastas elaboradas para ensayo, como porcentaje de contracción en quema, porcentaje de absorción, porcentajes de perdidas por ignición, resistencia a la flexión y módulo de rotura.

3.3 Procedimientos experimentales

3.3.1 Propiedades de la ceniza que sale del proceso de atomización

3.3.1.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la ceniza se realizaron según los métodos de ensayo de la norma INVIAS para suelos.

3.3.1.1.1 Gravedad específica

Para determinar la gravedad especifica de la CE, se realizó el procedimiento descrito por la norma INV E 128-13 (Normas y Especificaciones INVIAS, 2012). Para esto se pesaron 35 g de material húmedo y se transfirieron a un picnómetro de 100 ml, de una masa de 54,5 g y de 154,25 g cuando está lleno de agua sin aire a 20 °C. El picnómetro se llenó con agua destilada hasta la mitad, se agitó

y se extrajo el aire atrapado calentando hasta hervir y se llenó con agua hasta el aforo, repitiendo el mismo procedimiento para extraer el aire. Luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y se midió la masa del picnómetro con el agua y el sólido.

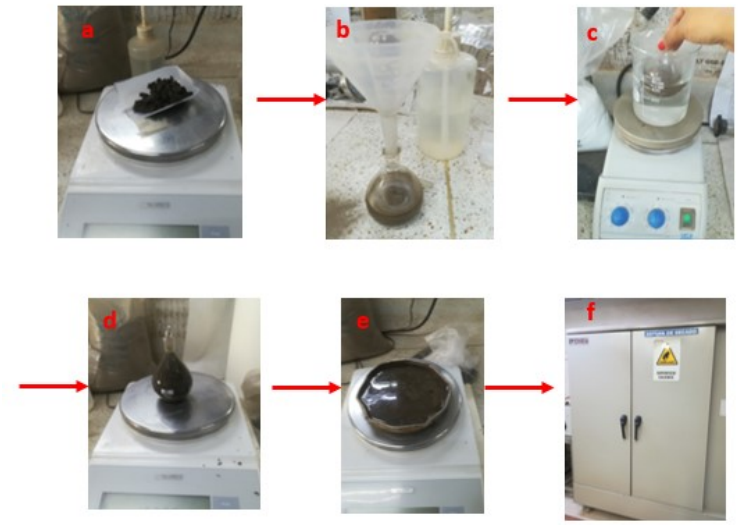

Figura 1. Determinación de gravedad específica de la CE como sale del proceso de atomización. a) Determinación de masa de la muestra inicial de ceniza húmeda. b) Llenado de picnómetro con la muestra y agua destilada. c) Extracción de aire atrapado por calentamiento. d) Determinación de masa de picnómetro + agua+ ceniza. e) Determinación de la masa de lechada transferida a un recipiente metálico f) Secado de lechada para determinación de masa seca de ceniza.

La lechada se transfirió a un recipiente, previamente pesado y se secó en una estufa Diez a 110 ± 5° C hasta masa constante y se determinó la masa seca del material, como se muestra en la Figura 1. Para determinar la gravedad específica a la temperatura de ensayo se usó la Ecuación 1

$$G = \frac{M_S}{(M_S + M_{P+A} - M_{P+A+S})} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

M_S: Masa de ceniza seca

M_{P+A}: Masa del picnómetro + agua, a la temperatura de ensayo

M_{P+A+S}: Masa del picnómetro + agua + ceniza, a la temperatura de ensayo

3.3.1.1.2 Humedad higroscópica

Se calculó la humedad higroscópica de la ceniza de carbón con el fin de conocer la cantidad de agua que posee cuando esta sale del proceso de atomización de arcillas. Esta se halla por diferencia de masa, secando 2 kg de ceniza húmeda en una estufa Diez a 110 ± 5° C hasta masa constante, según la ASTM C311 (American Society for Standard Materials and Testing, 2011) (Ver Figura 2). El porcentaje de humedad se determina utilizando la siguiente Ecuación 2.

$$\%Humedad = \frac{m_{H-}\, m_S}{m_H} x100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

m_H: masa del material húmedo

m_S: masa del material seco

Figura 2. Determinación de % de humedad higroscópica de la CE como sale del proceso de atomización.

3.3.1.1.3 Granulometría

3.3.1.1.3.1 Análisis por tamizado

Se realizó un análisis granulométrico a la CE, conforme a la norma para determinar la distribución de los tamaños de sus partículas. Para esto se tamizó 300g de ceniza seca 15 minutos, utilizando una tamizadora mecánica y la serie de tamices de la Tabla 8, como se observa en la Figura 3. Además, se determinó la masa retenida en cada y se calculó el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa, en base a la masa total de la muestra seca utilizada inicialmente, usando la Ecuación 3 ,4 y 5.

Figura 3. ado de la CE usando un agitador mecánico.

$$\%Retenido\ en\ el\ tamiz\ N°\ i = \frac{m_i}{m_T} x100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

m_i: masa de muestra seca retenida en el N° i

m_f: masa total de la muestra seca

$\%\ de\ muestra\ seca\ que\ pasa\ el\ tamiz\ N°\ i = \frac{m_{pi}}{m_T} x100$ Ecuación 4

Donde,

m_{pi}: % de muestra seca que pasa acumulado el N° i

m_f: masa total de la muestra seca

La masa total seca que pasa el N° i se calcula de la siguiente manera:

$m_{pi} = m_f - \sum_{tamiz\ N°\ I}^{tamiz\ N°\ i} m_i$ Ecuación 5

Donde,

$Tamiz\ N°\ I$= de malla con abertura más grande de la serie de tamices usados

Tabla 8. Tamices utilizados para análisis granulométrico de la CE.

Tamices Norma ASTM E11	
N° de Tamiz	Abertura (mm)
20	0,85
30	0,6
50	0,3
100	0,15
200	0,075
325	0,045

Finalmente, se determinó el porcentaje retenido en el N°325 usando la Ecuación 3. La Figura 4 muestra el tamizado vía húmeda, realizado para obtener la cantidad de material de una muestra de ceniza con tamaño mayor a 45 µm según la ASTM C430 (American Society for Testing and Materials, 2017).

Figura 4. ado húmedo de CE usando el N°325.

3.3.1.1.3.2 Análisis por hidrómetro

Además, se realizó un análisis por medio de un hidrómetro 151 H, que cumple los requisitos de la norma ASTM E 100, siguiendo la norma INV E-123-13 (Normas y especificaciones INVIAS, 2012), donde inicialmente se dispersó una muestra húmeda de 50g del material, en 125 ml de una solución de hexametafosfato y se dejó por 16h hasta saturación de la ceniza, para luego ser dispersada nuevamente transfiriendo dicha lechada a otro recipiente donde se agitó por un minuto en agitador magnético.

Finalmente, luego de terminar la dispersión se transfirió la lechada a una probeta para su sedimentación, como se muestra en la Figura 5, agregando agua destilada hasta completar un volumen de 1000 ml, la cual se sacudió por un minuto para luego tomar las lecturas con el hidrómetro, desde el instante en que inició la sedimentación, a los 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos. A su vez, se tomaron lecturas de temperatura inmediatamente después de hacer la lectura con el hidrómetro.

Figura 5. Ensayo con hidrómetro para la CE.

Al terminar la prueba del hidrómetro la suspensión se transfirió al N°200, donde se lavó con agua potable, hasta que el agua saliera clara. El retenido sobre este se transfirió a un recipiente metálico de peso conocido y se secó en una estufa Diez a 110 ± 5° C hasta peso constante.

El diámetro de partículas se calculó de acuerdo a la Ley de Stokes (Ecuación 6):

$$D = \sqrt{\left[\frac{30\mu}{980(G-G1)}\right] x \frac{L}{T}}$$ Ecuación 6

Donde,

D: Diámetro de partícula, mm

μ: coeficiente de viscosidad del medio de la suspensión (en este caso agua) de acuerdo a la temperatura, Pa.S

L: Profundidad efectiva, obtenida a partir de la lectura con el hidrómetro 151H corregida, mm

T: Lapso transcurrido desde la sedimentación hasta la toma de la lectura, min

G: Gravedad especifica de las partículas del suelo

$G1$: Gravedad especifica (densidad relativa) del líquido donde están suspendidas las partículas

El porcentaje de suelo que permanece en suspensión (% que pasa), se calculó con la Ecuación 7, y posteriormente se graficó %Porcentaje que pasa vs diámetro de partículas en **µ**m. Para el caso de % que pasa el N°200, se calculó restando el residuo a la muestra inicial seca, y se dividió por la masa seca de la muestra

$$\%\ Que\ pasa\ acumulado = \left[\left(\frac{100000}{Ws}\right) x \frac{G}{(G-G1)}\right](R - G1) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

Ws: Masa de la muestra seca, g

R: Lectura del hidrómetro corregida

G: Gravedad especifica de las partículas del suelo

$G1$: Gravedad especifica (densidad relativa) del líquido donde están suspendidas las partículas

La masa seca de la muestra (Ws) se calculó a partir de la masa húmeda del material utilizada en el ensayo (W_H) y de la humedad higroscópica hallada con la Ecuación 2, utilizando la siguiente formula:

$$Ws = \frac{W_H}{1+\frac{\%Humedad}{100}} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.3.1.2 Propiedades químicas

3.3.1.2.1 Morfología y composición puntual

Mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) se observó la morfología de la ceniza y adicional se hizo un análisis micro elemental SEM-EDS para confirmar los elementos químicos

presentes en determinado punto. Dicha prueba se llevó a cabo en la Universidad de Antioquia con un microscopio (termoiónico) JEOL-JSM 6490LV, utilizando una cámara en ultra-alto vacío.

3.3.1.2.2 Análisis químico por Difracción de rayos x

Esta técnica se utilizó para determinar las fases mineralógicas cristalinas de algunas materias primas. El material se pulverizó y tamizó para obtener un tamaño de partícula menor a 63 micras. Para la selección de la porción utilizada en el análisis de difracción, se cuarteó la muestra hasta obtener un peso de aproximadamente 2g. El difractómetro utilizado para este análisis fue un Bruker D8 Advance - Serie I, del laboratorio gmas consultores en Bogotá, que posee un detector LYNXEYE. Las medidas se realizaron de 5 a 70° con un tamaño de paso de 0,015° y una velocidad de barrido de 0,3 segundos por paso y el tubo de rayos x con ánodo de Co y filtro de Ni trabajó a 35KV y 30mA.

Los diferentes picos detectados se compararon con una base de datos Brucker y la cuantificación se realizó con el software TOPAS, el cual opera bajo el método de refinamiento Rietveld.

3.3.1.2.3 Análisis químico por fluorescencia de rayos x

Esta técnica se utilizó con el fin de determinar la composición de materias primas, en forma de óxidos, como el cemento y la ceniza. Este procedimiento se realizó utilizando un equipo MagixPro PW – 2440 Philips del laboratorio gmas consultores en Bogotá, donde previamente se secan las muestras a 105°C por un periodo de 12 horas, luego se homogenizan por agitación y se preparan en forma de pastillas con relación muestra: Cera C espectrométrica Merck, de 1:10. Posteriormente las muestras son llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por 1 minuto. De este modo se obtiene una pastilla de 37 mm de diámetro para ser medida en una aplicación semicuantitativa o cuantitativa. El análisis cuantitativo se realizó con el software SemiQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

3.3.1.2.4 Porcentaje de pérdidas por ignición

El %PI de la ceniza se determinó pesando una masa conocida de muestra seca (mi), e introduciéndola en una mufla Terrigeno en un crisol de porcelana (ver Figura 6) por 15 minutos hasta alcanzar una temperatura de 750 ± 50 °C y luego por 5 minutos sosteniendo dicha temperatura, según la ASTM C311 (American Society for Standard Materials and Testing, 2011). Finamente se deja enfriar la muestra y se pesa (mf), y se calcula el porcentaje de perdidas con la siguiente expresión:

$$\% PI = \frac{m_i - m_f}{m_i} X100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Figura 6. Mufla Terrigeno del laboratorio de Eurocerámica**.**

3.3.2 Características de los agregados utilizados para hacer las mezclas de concreto

Los agregados fueron caracterizados utilizando los métodos de ensayos descritos en la norma INVIAS para agregados pétreos.

3.3.2.1 Distribución granulométrica

Para la pómez y arena, se analizó la distribución granulométrica por tamizado. Las muestras tanto para este ensayo como para los descritos en los numerales 2.2.2 y 2.2.3, fueron reducidas por cuarteo manual previamente como se muestra en la Figura 7, según la norma INV E-202-13 (Normas y especificaciones INVIA , 2012). Posteriormente, se secó la muestra de pómez y de arena en la estufa a 110 ± 5°C hasta masa constante, y una porción de las muestras se tamizó utilizando la serie de tamices de la Tabla 8, agitándolos por 15 min en una agitadora mecánica, de acuerdo a la norma INV E-213-13 (Normas y especificaciones, INVIA, 2012). Además, para la piedra pómez se determinó el porcentaje de finos tamizando la muestra vía húmeda usando la malla N°200.

Tabla 8. Tamices utilizados para análisis granulométrico de los agregados.

Tamices Norma ASTM E11			
Agregado grueso		Agregado fino	
N° de Tamiz	Abertura (mm)	N° de Tamiz	Abertura (mm)
3/8"	9,5	3/8"	9,5
4	4,75	4	4,75
8	2,36	8	2,36
16	1,18	16	1,18
50	0,3	30	0,6
100	0,15	50	0,3
		100	0,15

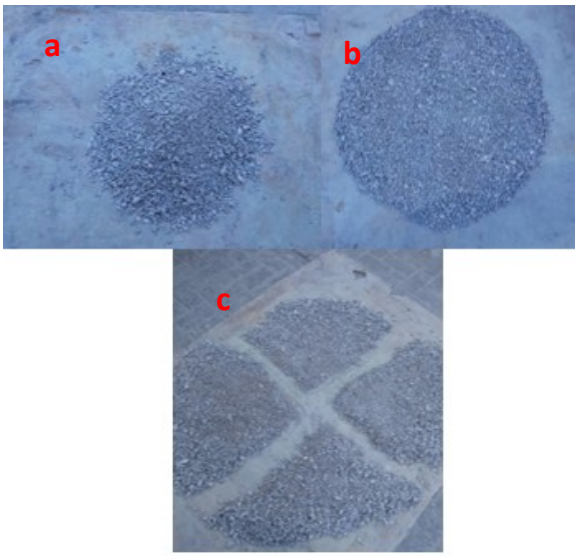

Figura 7. Proceso de reducción de muestra de piedra pómez manual. a) Muestra en forma de cono. b) Aplanamiento de cono. c) Muestra dividida en cuartos.

Finalmente se determinó la masa retenida en cada de cada porción de muestra, y se calculó el porcentaje total retenido y el porcentaje que pasa con base a la masa total de la muestra inicial seca, utilizando las Ecuaciones 3, 4 y 5. Para el caso de la arena, se calculó el módulo de finura sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices N° 100, 50, 30, 16, 8, 4 y 3/8", y dividiendo la suma por 100.

3.3.2.2 Porcentaje de absorción

Se determinó el porcentaje de absorción, según la INV E-222-13, únicamente a la arena utilizada para hacer las mezclas diseñadas de concreto, dado que la pómez se clasifica como agregado liviano según la NTC 4045 (Norma Técnica Colombiana, 2019). La muestra de arena se secó inicialmente en una estufa a 110 ± 5°C hasta masa constante y después se cubrió con agua por 24 h. Finalmente se decantó el agua y se tomaron 10 g de muestra de arena y se secó hasta masa constante a 110 ± 5°C. Se calculó la absorción del material usando la Ecuación 2, con la masa húmeda después de 24 h de

inmersión en agua y la masa resultante al secar la muestra húmeda (Normas y Especificacones INVIAS, 2012).

3.3.2.3 Densidad bulk (peso unitario)

La Figura 8 muestra el método de varillado o apisonado descrito por la norma INV E-217-13 (Normas y especificaciones INVIAS, 2012) para calcular la densidad bulk de la pómez, donde se llena un recipiente, previamente calibrado, con muestra seca en 3 etapas hasta llenarlo completamente y se determina la masa del recipiente lleno con la muestra y del recipiente vacío. Para el caso de la arena el método de llenado que se utilizó fue el de llenado a paladas. La densidad bulk se calculó utilizando la Ecuación 10.

$Densidad\ Bulk = \frac{m_{r+a} - m_r}{V}$ Ecuación 10

Donde,

m_{r+a}: Masa del recipiente lleno con la muestra

m_r: Masa del recipiente vacío

V: Volumen del recipiente

Figura 8. Método de Varillado o apisonado para determinar la densidad bulk para la piedra pómez.

3.3.3 Características del cemento y del Fortacret 10 (Metacaolín)

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó cemento de uso estructural tipo GU Rioclaro, según la ASTM C 1157-11 (Tipo UG según NTC 121), de la empresa Cementos Argos S.A, y Fortacret 10 de Insumos industriales de la Organización Corona, clasificada como puzolana Tipo N según la ASTM C 618-15. En las Tablas 10 y 11 se muestran los parámetros de calidad reportados del cemento y el Fortacret 10 respectivamente, los cuales fueron verificados para efectos de validación.

Tabla 10. Parámetros de calidad del cemento (Grupo Argos S.A).

Parámetro	Valor promedio
MgO %	2,5 ± 0,1
SO3 %	2,9 ± 0,1
PI %	5,6 ± 0,3
Blaine (cm^2/g)	4852 ± 137
% Retenido M325	0,5 ± 0,1
Fraguado inicial (min)	114 ± 3
Fraguado Final (min)	238 ± 4
Resistencia a compresión 1 día (MPa)	17,3 ± 1,1
Resistencia a compresión 3 día (MPa)	33,4 ± 2
Expansión en autoclave (%)	Máx. 0,80

Tabla 11. Parámetros de calidad del Metacaolín (Sumicol, Corona, 2017).

Parámetro	Valor típico reportado en FT
%SiO2 + % Al2O3 + %Fe2O3	>85%

%SO3	< 0,5%
%PI, a 800°C	< 2,5%
% De Humedad	< 3%
% Retenido M325	< 3%

3.3.3.1 Validación de Parámetros Físicos y mecánicos del Cemento y el producto Fortacret 10

Para la determinación del porcentaje de material retenido sobre el N°325 para el cemento y el Fortacret10, se siguió el procedimiento descrito en el numeral 3.3.1.1.3.1.

3.3.3.1.1 Determinación de finura del cemento con el permeabilimetro de Blaine

Para complementar el ensayo de tamizado sobre malla 325, se llevó a cabo el ensayo para determinar la finura del cemento, como parámetro determinante en la reactividad del cemento en su reacción de hidratación. El ensayo se llevó a cabo según la norma NTC 33 utilizando un permeabilimetro de Blaine marca Controls (NTC 118, 2019). El ensayo se realizó en el laboratorio de suelos, concreto y pavimentos de la Universidad EAFIT, junto con los ensayos de tiempo inicial y final de fraguado, y expansión en autoclave.

Figura 9. Determinación de finura del cemento usando un permeabilimetro Blaine .

3.3.3.1.2 Determinación de tiempo de fraguado inicial y final de cemento

El tiempo de fraguado del cemento se determinó a través del método de ensayo descrito en la norma NTC 118, utilizando una aguja de Vicat marca Controls (NTC 118, 2019)**.** Previamente al ensayo se determinó la cantidad de agua a usar en la mezcla, a través del método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico de la norma técnica colombiana (NTC 110, 2019).

Figura 10. Ensayo para determinar tiempo de fraguado del cemento con aguja vicat.

3.3.3.1.3 Determinación de la expansión en autoclave del cemento

El porcentaje de expansión en autoclave del cemento utilizado, se realizó siguiendo el método descrito en la NTC 107 (NTC 107, 2019), y para esto se utilizó una cámara de humedad, un autoclave con dial análogo y medidor de longitudes Controls.

Figura 11. Determinación de porcentaje de expansión del cemento en autoclave.

3.3.3.2 Validación de Parámetros químicos del Cemento y el producto Fortacret 10

El contenido de humedad del producto Fortacret 10 se determinó igual que en el numeral 3.3.1.1.2. Además, se calcularon las pérdidas por ignición (%PI) como se explicó en el punto 3.3.1.2.4, sin embargo, para el cemento la muestra se calentó hasta 950 ± 50 °C en un crisol tapado.

3.3.4 Elaboración de mezclas de concreto y probetas para ensayos

Se elaboraron mezclas de concreto, utilizando la ceniza de Eurocerámica y metacaolín (MK) como reemplazo de cemento, donde el porcentaje total de reemplazo fue del 20% con variaciones del 5% de las cantidades de ceniza y metacaolín (S. Sujjavanich, 2017). Las mezclas se realizaron siguiendo el diseño utilizado para el producto Eurostone el cual es un concreto liviano (muestra Patrón) que ya incluye el metacaolín, donde la relación agua/material cementante se mantuvo en 0,5 agregando un aditivo superplastificante. Las proporciones de los materiales utilizados en las mezclas se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Proporciones de las mezclas de concreto.

Denominación de la mezcla	Cemento (kg/m^3)	adición (kg/m^3)	a/c	Agregado grueso liviano (kg/m^3)	Agregado fino (kg/m^3)
Patrón (16% MK)	330,2	MK:62,9	0,5	184,1	693,8
5% CE: 15% MK	314,5	CE:19,7 MK:58,9		184,1	693,8
10% CE: 10% MK	314,5	CE:39,3 MK:39,3		184,1	693,8
15% CE: 5% MK	314,5	CE:58,9 MK:19,7		184,1	693,8
20% CE: 0% MK	314,5	CE:78,6		184,1	693,8

Una vez realizadas las mezclas, se hicieron probetas cilíndricas utilizando formaletas de 100 x 200 mm y probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, las cuales fueron desencofradas a las 24 h y curadas en agua hasta las edades de ensayo, como se muestra en la Figura 12. Para este trabajo se eligió 3, 7, 28 y 90 días de curado.

Figura 12. Elaboración de probetas en concreto para ensayos. a) Llenado de cilindros con mezcla de concreto. b) Molde para probetas prismáticas. d) Curado de probetas en agua.

3.3.5 Activación mecánica de la ceniza

La CE seca se sometió a molienda en un molino de bolas por 2 horas, con una velocidad de 58 rpm, para reducir su tamaño de partícula (Ver Figura 13) y evaluar su influencia en las propiedades del concreto obtenido, ya que la reactividad de una ceniza volante puede ser incrementada mediante activación mecánica (Valderrama C., 2011). Las características físicas de este material se evaluaron de acuerdo a los métodos descritos anteriormente en el numeral 2.1.1.

Figura 13. Molino de bolas sobre rodillos del laboratorio de Euroceramica.

Figura 14. Ceniza seca y molida.

3.3.6 Caracterización de los concretos

3.3.6.1 Resistencia a la flexotracción y compresión

Se determinó la resistencia a la compresión según la norma NTC 673 a los cilindros de concreto adicionados con CE en las edades de ensayo correspondientes, con el fin de evaluar su desempeño mecánico. Dichas pruebas se llevaron a cabo en los laboratorios RAER Ingenieria S.A.S en Rionegro, Antioquia, usando una máquina para ensayo de compresión Lexus Matrix con capacidad máxima de 1200 KN (Ver Figura 15), registrando la carga máxima soportada por el cilindro, para luego calcular la resistencia dividiendo por el área de la sección transversal del espécimen.

Figura 15. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto.

Para el ensayo de resistencia a la flexión se usó un flexímetro marca Labotronic (Figura 16) con carga máxima de 1000 kg, donde se ubica la probeta de forma centrada y por el lado más largo sobre las barras cilíndricas de apoyo, aplicándole una carga con una velocidad de 2640 N ± 110 N con incrementos de no más de 40 N. La resistencia a la flexión y el módulo de rotura se calculó usando las siguientes formulas:

$S\ (MPa) = \frac{Fx\ L}{W}$ Ecuación 11

Donde,

S: Resistencia a la flexión

F: Carga aplicada hasta la rotura (N)

L: Longitud de separación entre cilindros de apoyo (mm)

W: Ancho de la probeta (mm)

$R\ (MPa) = \frac{3\ x\ Fx\ L}{2\ x\ t^2\ x\ W}$ Ecuación 12

R: Módulo de rotura

F: Carga aplicada hasta la rotura (N)

L: Longitud de separación entre cilindros de apoyo (mm)

t: espesor de la probeta (mm)

W: Ancho de la probeta (mm)

Figura 16. Flexímetro del laboratorio de Eurocerámica.

3.3.6.2 Porcentaje de absorción y Densidad

Para evaluar la durabilidad de los concretos, se halló la cantidad máxima de agua que es capaz de retener los especímenes a las edades de 28 días. En la Figura 17 se puede observar el proceso donde, inicialmente se pesaron las probetas prismáticas superficialmente secas, que previamente habían estado sumergidas en agua hasta la edad de ensayo, y además se determinó la masa aparente de las probetas sumergidas en agua. Por último, se secaron en estufa a 110°C ± 5°C por 72 h hasta masa constante. El porcentaje de absorción de cada probeta se calculó utilizando la Ecuación 2 y además se calculó la densidad de estas siguiendo la ASTM C567 (ASTM International, 2014) usando la siguiente expresión:

$\rho_S = \frac{(m_s x 977)}{(m_H - m_{aH})}$ Ecuación 13

Donde,

m_s: Masa del espécimen seco, Kg

m_H: Masa del espécimen superficialmente seco después de inmersión en agua, Kg

m_{aH}: Masa aparente del espécimen húmedo suspendido en agua, Kg

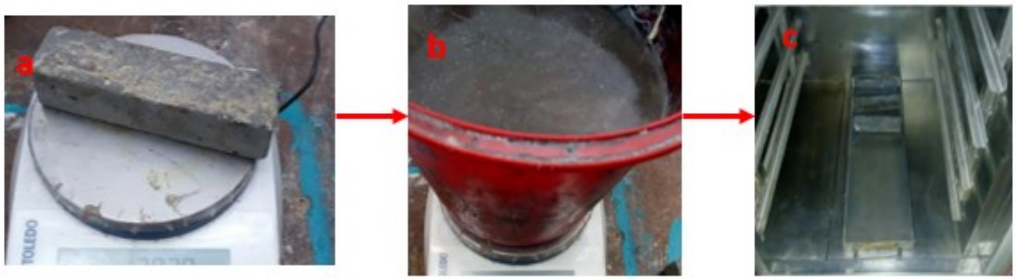

Figura 17. Proceso para determinar % de absorción y densidad en seco de probetas en concreto. a) Determinación de peso de probeta superficialmente seca. b) Determinación de peso aparente de probeta. c) Secado de probetas en estufa.

3.3.7 Elaboración de mezclas para pastas cerámicas y probetas para ensayos

3.3.7.1 Homogenización de las mezclas

En la Figura 18 se muestra el proceso de la elaboración de mezclas para pastas cerámicas, donde inicialmente se tomaron muestras de las arcillas utilizadas en la formulación de la pasta utilizada actualmente en Eurocerámica, del chamote y la ceniza, y se secaron en una estufa Dies a 150°C por 10 horas. Posteriormente se trituró con un martillo de forma manual la totalidad de las muestras de arcillas, y se trituraron en una trituradora Retsch a 3450 rpm. A cada triturado se le midió el porcentaje de humedad, tomando una muestra de 100 g y secándola en la estufa a 150°C por 1 hora.

Para optimizar la cantidad de ceniza que se puede agregar a la formulación de la pasta cerámica se realizaron mezclas variando el porcentaje de ceniza desde un 1% hasta un 5%, sobre el peso total de las arcillas, así como la muestra patrón. Para esto se calculó inicialmente la cantidad de gramos húmedos de cada arcilla a cargar para la molienda (Ecuación 15), teniendo en cuenta la humedad de estas después de triturarlas y que el molino trabaja con una relación 65:35 solido/agua. Las mezclas se homogenizaron con una velocidad de molienda de 58 rpm para un tiempo promedio de 158 minutos, para obtener una barbotina con una densidad de 1,70 g/cm^3 y un residuo en Malla ASTM N°270 entre 13,5 y 14,5 g.

$$m\ humeda\ a\ cargar = \frac{m\ seca\ x100}{100-\%humedad}$$ Ecuación 14

$$ml\ de\ agua\ \ para\ molienda = \left(\frac{g\ totales\ de\ arcillas\ secosx35}{65} + g\ totales\ de\ arcillas\ secos\right) - g\ totales\ de\ arcillas\ humedos$$ Ecuación 15

Figura 18. Proceso para la obtención de la pasta cerámica. a) Secado de arcillas. b) Trituración manual de arcillas. c) Trituración de arcillas con la trituradora Retsch. d) Toma de muestra para medir humedad de materias primas después de trituración. e) Cargue de molino de bolas con materia prima. f) Homogenización de materias primas en molino de bolas. g) ado de barbotina usando malla N° 270. h) Determinación de residuo en malla N°270. i) Disposición de barbotina en recipientes metálicos para secado. j) Secado de barbotina en estufa a 150°C. k) Trituración manual de la pasta obtenida. l) Trituración de pasta hasta tamaño menor a malla N° 20. m) Humectación de pasta triturada para ajustar humedad. n) ado de pasta usando malla N° 20 usando vibro .

Finalmente se secó la molienda en la estufa Dies a 150°C por 6 horas y se trituró en la trituradora Retsch utilizando la malla ASTM N°20. A las muestras trituradas se les ajustó la humedad a 7,6%, adicionando agua con un aspersor y homogenizando, con el fin de favorecer la trabajabilidad y

plasticidad de la mezcla, para finalmente hacer pasarlas por la malla ASTM N°20 utilizando un vibro FORO.

3.3.7.2 Conformación de probetas

Se obtuvieron probetas de 100x50 mm por conformación en matriz rectangular, aplicando una doble presión mediante una prensa hidráulica con una fuerza inicial de 15 bar, que después se incrementó a una velocidad constante que no superó los 30 bar, con el fin de obtener compactos de 8 mm de espesor y con densidades de 2,05 g/cm^3 (Ver Figura 20).

Figura 19. Prensa Hidráulica del laboratorio de Eurocerámica

Figura 20. Obtención de probeta elaborada con pasta cerámica de tamaño 100 x 50 mm

Después de compactar las probetas, estas se secaron en una estufa a 150°C por 2 horas, determinándose la contracción en seco, y posteriormente se sometieron a un proceso de cocción por un tiempo de 43 minutos en un horno de rodillos, dividido en 5 zonas como se muestra en la Tabla 13.

Figura 21. Horno de rodillos del laboratorio de Eurocerámica

Tabla 13. Zonas de temperatura en el horno

Zona del Horno	Temperatura
Precalentamiento 1	650°C
Precalentamiento 2	850°C
Zona de quema	1140°C
Enfriamiento 1	580°C
Enfriamiento 2	560°C

Las probetas que se utilizan para medir la resistencia mecánica se esmaltaron después del secado y posteriormente se quemaron.

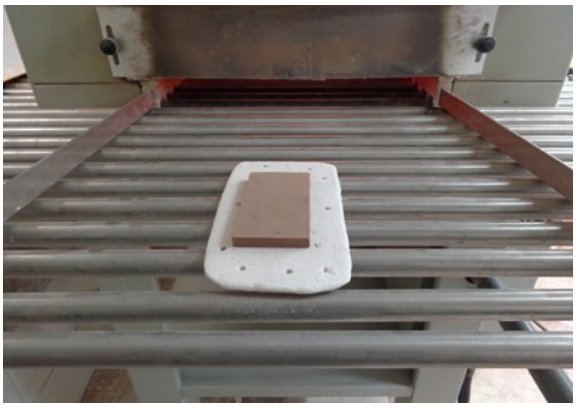

Figura 22. Proceso de cocción de probeta elaborada con pasta cerámica adicionada con CE

3.3.8 Caracterización de los materiales cerámicos

3.3.8.1 Propiedades físicas de probetas cerámicas

Se determinó las perdidas por ignición, absorción y contracción en quema de las diferentes mezclas de arcillas y ceniza, así como de la muestra patrón.

3.3.8.1.1 Contracción en quema

Se midió con un pie de rey digital de precisión ± 0,01 mm la longitud de las probetas después del secado (L_S), como se muestra en la Figura 23. Después de quemar las probetas se dejaron enfriar por 15 minutos hasta temperatura ambiente y se midió la longitud después de la etapa de cocción (L_Q). El porcentaje de contracción en quema se calculó de la siguiente manera:

$$\%\ Contracción\ en\ quema = \frac{L_S - L_Q}{L_S}\ X100 \quad \text{Ecuación 16}$$

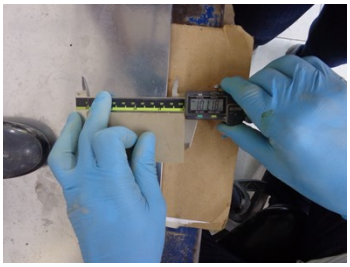

Figura 23. Medición de longitud de probetas elaboradas con pasta cerámica después del secado

3.3.8.1.2 Pérdida de peso por ignición

Para obtener la pérdida de peso por ignición se pesaron las probetas inmediatamente después del secado y después de enfriar las probetas posteriormente a la cocción. El porcentaje de perdida se calculó utilizando la siguiente formula:

$$\% P.P.I = \frac{P_S - P_Q}{P_S} X100$$ Ecuación 17

3.3.8.1.3 Absorción de agua

La absorción de agua se determinó por el método de ebullición según la norma NTC 4321-3 (NTC 4321-3, 2015) . Como se muestra en la Figura 24, inicialmente las probetas quemadas (m1) se pesaron y se sumergieron en agua. El agua se calentó hasta ebullición y se continuó con la ebullición durante 2 horas, después se quitó la fuente de calor y las baldosas se dejaron sumergidas durante 4 horas hasta enfriar. Finalmente, se retiraron del agua, se quitó el exceso de agua con un trapo húmedo y se pesaron (m2). El porcentaje de absorción se calcula según la siguiente ecuación:

$$\% E = \frac{m_2 - m_1}{m_1} X100$$ Ecuación 18

Figura 24. Inmersión de probetas cerámicas quemadas en agua a temperatura de ebullición

3.3.8.2 Propiedades mecánicas de probetas cerámicas

3.3.8.2.1 Resistencia a la flexotracción

La Figura 25 muestra el ensayo de resistencia a la flexión hecho a probetas cerámicas, según la NTC 4321-4 (NTC 4321-4, 2015). En este caso se aplicó una carga con una velocidad de aumento del esfuerzo de 1 N/mm^2 por segundo, sobre la cara esmaltada de la baldosa, usando el mismo esquipo descrito en el numeral 2.6.1 para determinar la resistencia a la flexotracción. Igualmente, para los cálculos se usaron las Ecuaciones 11 y 12.

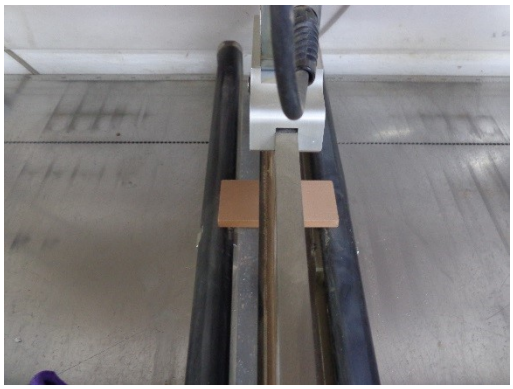

Figura 25. Ensayo de resistencia a la flexión en probetas cerámicas quemadas

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para caracterizar las materias primas y los productos obtenidos en concreto y cerámica, con el fin de evaluar la incorporación de ceniza en dichos productos y el porcentaje optimo, teniendo en cuenta el desempeño de dichos productos.

4.1 Caracterización de Materias primas

4.1.1 Ceniza obtenida del proceso de atomización

La CE obtenida de la quema de carbón, como combustible, en el proceso de atomización para el secado de la barbotina, tiene una gravedad específica y un porcentaje de humedad promedio de 2,02 y 52,87 ± 0,42 %, respectivamente. Luego de ser sometida a un proceso de molienda, se obtuvo una CE con una gravedad específica de 2,44, lo cual es común en cenizas que provienen de la quema de carbón las cuales tienen gravedades específicas que varían de 1,90 para una ceniza subbituminosa a 2.96 para una ceniza bituminosa rica en hierro (Gang X., 2018)

4.1.1.1 Análisis de granulometría

En la Tabla 14 y 15 se muestran las granulometrías de la CE y la CE luego de ser activada mecánicamente, con una molienda en molino de bolas. El módulo de finura obtenido para cada material fue respectivamente 0,01 y 0,001. Por su parte, el retenido en malla N°325 después del tamizado húmedo fue de 86,4% para la CE, y de 0,38% para la CE después de 2 horas de molienda, comprobando así la efectividad de dicho método para la activación mecánica de la ceniza. De dichos resultados se concluye entonces, que la ceniza obtenida directamente del proceso de la quema de carbón no cumple con uno de los requisitos de la NTC 3493 (NTC 3493, 2017), la cual exige un porcentaje máximo de retenido en el N°325 de 35% para poder ser usada en concreto, por lo que para dicha aplicación debería pasar por un proceso físico-mecánico para poder disminuir su tamaño de partícula promedio. En cenizas obtenidas de carbón sub bituminoso, la distribución de tamaño de partícula es similar a la del limo (Ahmaruzzaman, 2010), aunque generalmente son un poco más gruesas que las de carbón bituminoso, sin embargo, en este caso la CE ha tenido que pasar por un proceso de molienda para pasar de un tamaño arenoso a un tamaño limo.

Tabla 14. Granulometría de CE

N° Malla ASTM E11	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa acumulado
20	8,9	3%	3%	97%
30	12,3	4%	7%	93%
50	9,7	3%	10%	90%
100	64,5	22%	32%	68%
200	94,2	31%	63%	37%
325	65,7	22%	85%	15%
Fondo	44	15%	100%	0%

Tabla 15. Granulometría de la CE activada mecánicamente

N° Malla ASTM E11	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa acumulado
20	0	0,00%	0,00%	100,00%
30	0,8	0,80%	0,80%	99,20%
50	0,8	0,80%	1,60%	98,40%
100	1,9	1,90%	3,50%	96,50%
140	2,9	2,90%	6,40%	93,60%
200	7,7	7,70%	14,10%	85,90%
325	42,4	42,40%	56,50%	43,50%
Fondo	42,8	42,80%	99,30%	0,70%

Por otro lado, para complementar los resultados anteriores, se analizó la distribución de tamaño de partículas para cada uno de los materiales utilizando el método por hidrómetro, con el fin de tener en cuenta los tamaños más finos. En las Figuras 26 se muestran los resultados de dichas pruebas, los cuales se utilizaron a su vez para calcular el diámetro medio aritmético de partícula para las dos muestras, basado en la función de densidad discreta normalizada de los porcentajes retenidos acumulados por unidad de tamaño de partícula. Dichos resultados se encuentran en concordancia con lo obtenido en la prueba por tamizado, donde para la CE todas sus partículas son de tamaño mayor a 10 µm y solo el 42,18% de estas son más pequeñas que 75 µm, mientras que para la CE activada más del 13% es de tamaño menor a 10 µm y el 93,96% es de tamaño menor a 75 µm

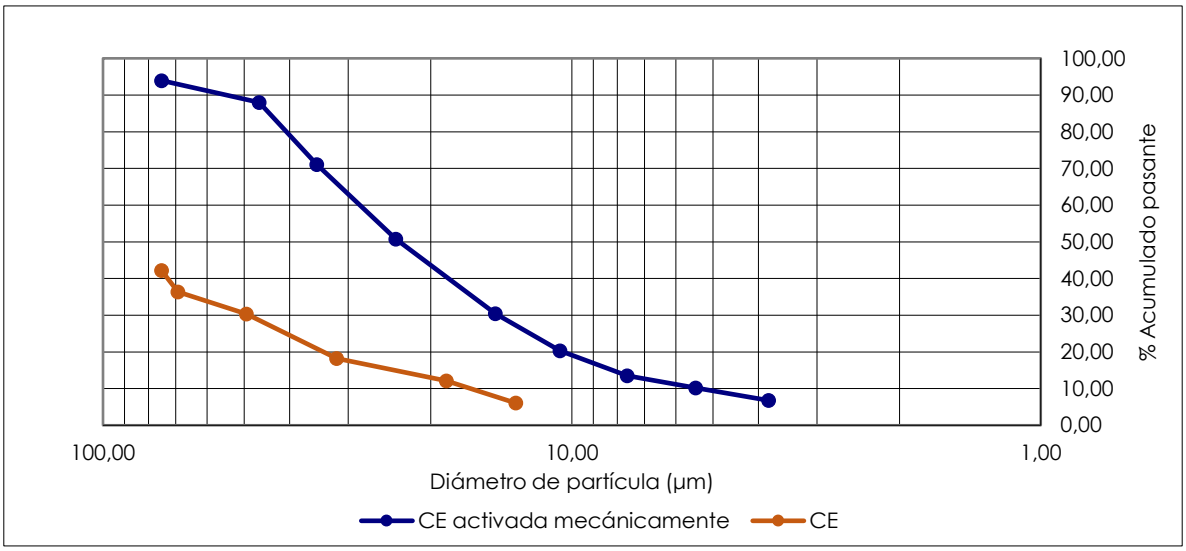

Figura 26. Análisis granulométrico de CE por hidrómetro antes y después de la molienda

Finalmente, La Figura 27 muestra dónde se localiza la distribución de partículas de la CE activada a través de la función de frecuencia normalizada continua de porcentajes retenidos acumulados por unidad de tamaño de partícula, la cual muestra una distribución sesgada hacia los tamaños entre 2 y 20 µm, mientras que para la CE la distribución es totalmente asimétrica y se encuentra totalmente sesgada hacia los tamaños más gruesos, mayores a 60 µm, lo que resulta común para un gran número de sistemas particulados (Capítulo3. Sistemas de Partículas). El diámetro medio de partícula encontrado para la muestra de ceniza, que fue sometida a un proceso de molienda, fue de 13,54 µm, el cual se calculó utilizando la Ecuación 19.

$$d_{ap} = \frac{\sum n(di) * dpi}{\sum n(di)} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde,

d_{ap}: Diámetro aritmético promedio de la distribución, µm

$n(di)$: Función de frecuencia continua del diámetro de partícula en el intervalo de clase i expresada como % retenido acumulado/µm

dpi: Diámetro promedio del intervalo de clase i, µm

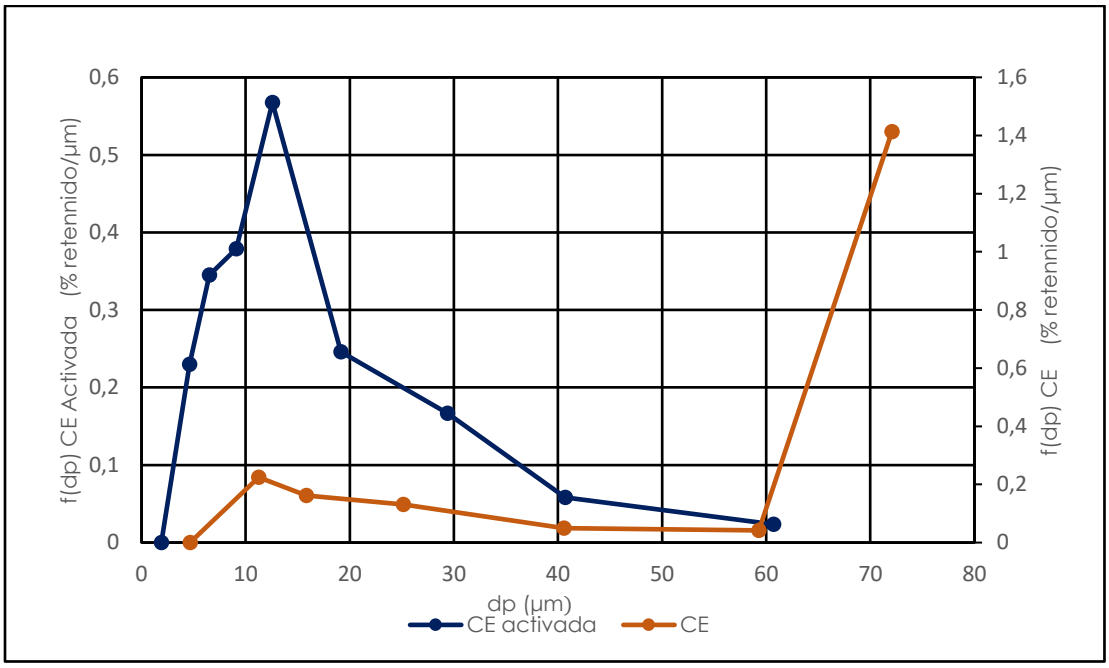

Figura 27. Tamaño medio de partícula de la CE activada mecánicamente

4.1.2 Análisis de morfología por microscopía electrónica de barrido y micro elemental

En la Figura 28 se observa la morfología de la ceniza obtenida en Eurocerámica, la cual está compuesta de un aglomerado de partículas irregulares con texturas superficiales ásperas y porosas (esfera vesicular) Y formas esponjosas de CE, que surgen como resultado de un enfriamiento lento después de salir de la cámara de combustión y que se encuentran más comúnmente en las fracciones de gruesos de CE (Golewski G. , 2017), acompañadas de partículas más pequeñas con forma esférica, lo que indica una alta posibilidad de combinarse fácilmente con otras sustancias. Algunos autores sugieren que el enriquecimiento de elementos en la fracción de tamaños más pequeños de la ceniza ocurre mientras el material incombustible se funde (material inorgánico proveniente del carbón), el azufre y los metales se vaporizan y, posteriormente, se nuclean y se

combinan con pequeñas gotas de material inorgánico fundido recubriéndolos con dichos metaloides semi-volátiles condensados o que ya han reaccionado (Brown P., 2011).

Al analizar la composición puntual de dicha ceniza en un punto por EDS (Ver Figura 29), se observa un alto porcentaje de carbono en la muestra, el cual está asociado al carbón inquemado debido a un proceso de combustión ineficiente en el atomizador, y que puede ser un obstáculo para el uso de cenizas volantes en industrias como la del cemento y concreto, ya que dicho carbón puede absorber los aditivos inclusores de aire que se agregan a las mezclas de concreto para mejorar las propiedades del producto final (Howera J., 2017). Wagner et al. sugiere tres hipótesis para explicar la presencia de carbón inquemado en las cenizas. La primera es que la temperatura en el fondo del gasificador es la alcanzada por la reacción exotérmica entre el carbón residual y el contenido de oxígeno del agente de gasificación, y la energía potencial de dicha reacción es más baja que el efecto de enfriamiento de la explosión del agente de gasificación (340 °C), por lo que la combustión no se puede mantener y un porcentaje de char se mantendrá en la ceniza. Otra razón para la presencia de carbón residual se puede atribuir a la posibilidad de que las partículas son capturadas en las zonas de enfriamiento a través del reactor (canales) y no son expuestas a las condiciones reactivas requeridas para la conversión completa. Por último, una tercera teoría potencial podría ser que el tamaño máximo de las partículas que entran en el gasificador no obtienen suficiente tiempo para reaccionar (lento ritmo de calentamiento) y terminan pasando a través del mismo, sin reaccionar en su núcleo (Wagner, Matjie, Slaghuis, & van Heerden).

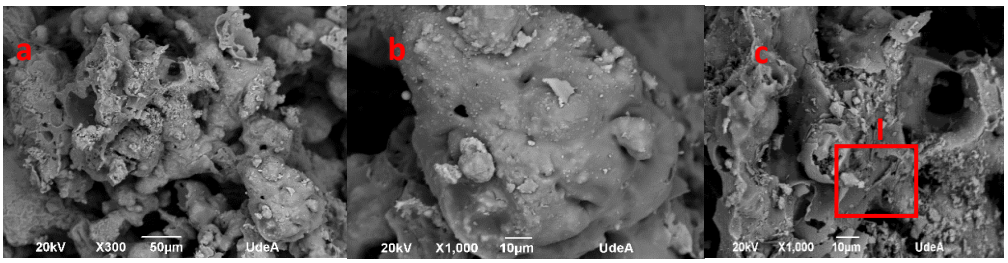

Figura28. Imágenes SEM donde se aprecia la morfología de la CE. a) Imagen panorámica de CE. b y c Imágenes panorámicas de CE an1000X.

b

Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	7.79	0.3756	44.67	2.46	60.59
O K	4.27	0.4543	20.26	1.31	20.63
Na K	0.31	0.9244	0.71	0.16	0.51
Mg K	0.18	0.8335	0.46	0.13	0.31
Al K	4.49	0.9172	10.54	0.52	6.36
Si K	6.00	0.8425	15.34	0.74	8.90
K K	0.54	1.0074	1.15	0.15	0.48
Ca K	0.71	0.9576	1.61	0.17	0.65
Ti K	0.28	0.8050	0.75	0.18	0.26
Fe K	1.69	0.8056	4.51	0.39	1.32
Totals			100.00		

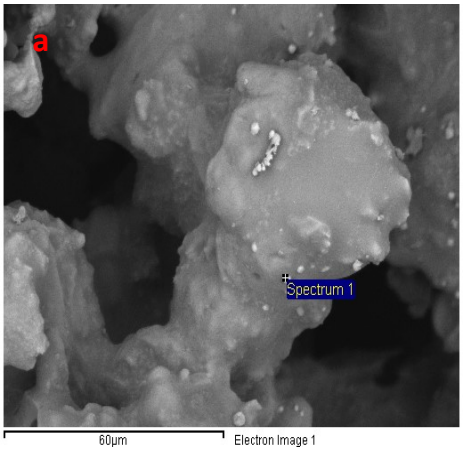

Figura 29. Composición puntual de una partícula. a) Imagen de partícula tomada de la zona I de la imagen 28.c. b) Composición química de la partícula en la imagen 29.a

4.1.2.1 Caracterización mineralógica por difracción de rayos x (DRX)

La Figura 30 muestra el espectro obtenido al realizar el difractograma de la CE, donde claramente se evidencian 3 fases cristalinas, Cuarzo (SiO2), Mullita ($Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-X}$;(X~0,4)) y Anortita (CaAl2Si2O8) mayoritariamente. La fase amorfa del material puede evidenciarse en el leve cambio en la línea base del patrón entre 2θ= 10 y 40

Los porcentajes de Cuarzo y Mullita en el material se encuentran dentro del rango reportado en diferentes cenizas, los cuales van del 3-24% en peso para cenizas bajas en Ca (Gang X., 2018)

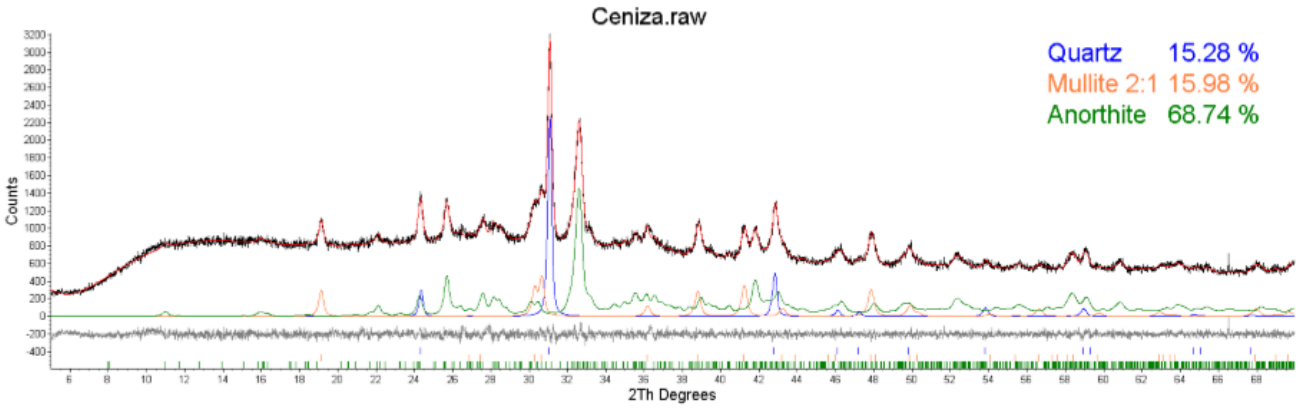

Figura 30. Difractograma obtenido de la muestra de CE

4.1.2.2 Análisis composicional por fluorescencia de rayos x (FRX)

En la Tabla 16 se presenta la composición de la CE dada en forma de óxidos, donde se puede apreciar que dicho material está compuesto principalmente por elementos de Oxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y en menor proporción de óxido de hierro (Fe_2O_3), lo cual se corresponde con lo encontrado en el espectro obtenido por DRX, donde las fases minerales encontradas contienen Al, Si y Fe. Además, el porcentaje de perdidas por ignición de la CE es del 1,1%, por lo que en este sentido la CE se clasifica como una ceniza volante Tipo F según la NTC (NTC 3493, 2017), debido a que tiene más del 70% de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3, un contenido de SO_3 menor al 5% y un % P.P.I < 6.

Cabe destacar además la concentración de óxido de calcio (CaO)que tiene la CE, ya que, según lo reportado, en un ambiente alcalino las cenizas volantes bajas en calcio no son reactivas debido a la naturaleza inerte de la mayoría de las fases cristalinas presentes en ellas. Mientras que, las cenizas altas en calcio son reactivas debido a la presencia de algunas fases cristalinas reactivas (Hemalatha T., 2017). Por el contrario, el tener una baja presencia de este oxido, como es el caso de las cenizas

Tipo F si las comparamos con las Tipo C, hace que el material tenga una mayor eficiencia en la reducción de la expansión en concretos, reduciendo la cantidad de iones alcalinos disponibles en los poros de la solución, que pueden reaccionar con agregados potencialmente reactivos (Ruiz W., 2017)

Tabla 16. Resultados de FRX para la muestra de CE

Elemento y/o Compuesto	% en peso
SiO2	48,72%
Al2O3	30,37%
Fe2O3	7,78%
CaO	4,87%
Na2O	2,91%
MgO	1,94%
K2O	1,34%
TiO2	1,30%
Ba	0,32%
P2O5	0,07%
SO3	0,06%
V	0,06%
Ce	0,05%
Cr	0,04%
MnO	0,04%
Sr	0,04%
Cu	0,03%
Ni	0,02%
Zn	0,02%
Zr	0,02%
Rb	86 ppm
Y	57 ppm
Nb	15 ppm

Por otro lado, la CE se puede clasificar como una ceniza bituminosa dado que %Fe2O3 > %CaO + %MgO. Para este tipo de cenizas se calculó el factor de escoriamiento, para poder verificar la cantidad de capas de escorias que puede tener el material a través del tipo de escoriamiento, que resulta ser bajo para este tipo de cenizas (Tabla 17). Este fenómeno de escoriamiento, que se da cuando la materia mineral es calentada por encima de la temperatura crítica, produciendo una fase

líquida en una parte de los minerales presentes en el carbón, formando escorias que posteriormente caen por su peso (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín), las cuales resultan beneficiosas cuando las cenizas se emplea como relleno en pastas cerámicas, confiriéndole estabilidad en el proceso de cocción. Para el caso de la aplicación en concreto, dicho fenómeno no resulta ser tan beneficioso, puesto que esto restaría la cantidad de material reactivo disponible para reaccionar con el hidróxido de calcio, en la reacción de hidratación del cemento.

Para cenizas bituminosas el factor de escoria miento se calculó de la de la siguiente manera:
$FEB = \frac{\mathrm{Fe2O3 + CaO + MgO + Na2O + K2O}}{\mathrm{SiO2+Al2O3+TiO2}} X\ \mathrm{SO3} = 0{,}014$ Ecuación 20.

Tabla 17. Potenciales de escoriamiento de las cenizas bituminosas

Factor de escoriamiento	Tipo de escoriamiento
Menor que 0,6	Bajo
0,6 a 2,0	Medio
2,0 a 2,6	Alto
Mayor que 2,6	Severo

Finalmente, el porcentaje de SO3 de la ceniza resulta bajo, lo cual es positivo si la ceniza es utilizada en concretos reforzados con acero, ya que un alto porcentaje afecta la calidad del acero

4.1.3 Caracterización de los agregados para mezclas de concreto

A partir del análisis granulométrico realizado para los agregados, los cuales se muestran en las Tablas 18 y 19, se obtuvo un módulo de finura para la arena de 4,15 y un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4”. Además, se determinó sus pesos unitarios (Densidad bulk) y el porcentaje de absorción del agregado fino, donde la densidad obtenida para la arena fue de 1621,88 kg/m^3 y un 3% de absorción, y para el caso de la pómez su peso unitario es 419,19 kg/m^3 cumpliendo

así con uno de los requerimientos de la norma técnica colombiana para agregados livianos para concreto estructural NTC 4045, donde el peso unitario máximo para agregado grueso es 880 kg/m^3.

Tabla 18. Granulometría arena

N° Malla ASTM E11	Peso Retenido (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	% Que pasa acumulado
3/8 "	0	0%	0%	100%
4	46,7	16%	16%	84%
8	132	44%	60%	40%
16	48,4	16%	76%	24%
30	22,4	7%	83%	17%
50	15,4	5%	88%	12%
100	14	5%	93%	7%
Fondo	21,1	7%	100%	0%

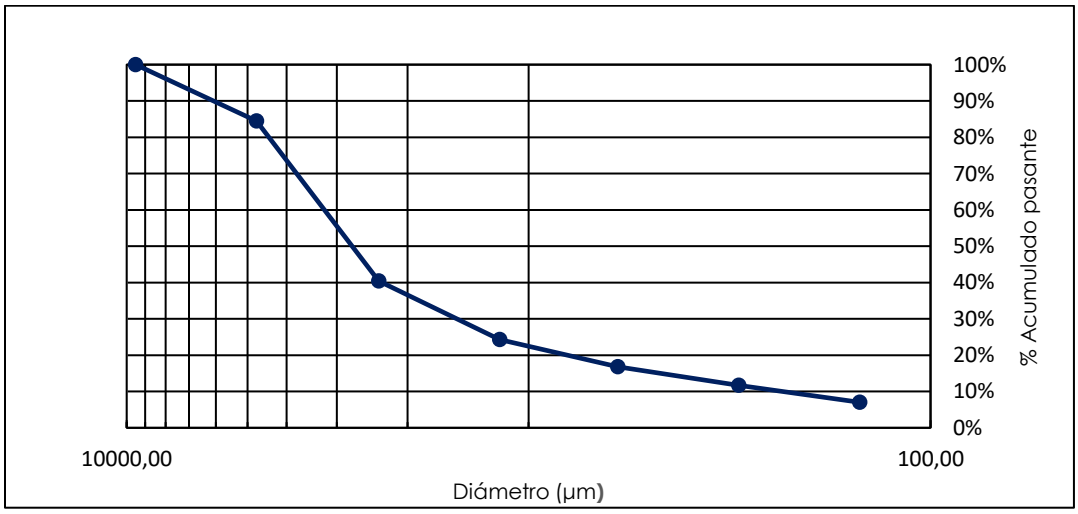

Figura 31. Distribución granulométrica de la arena

Tabla 19. Granulometría de la piedra pómez

N° Malla ASTM E11	Peso retenido (g)	% RetenidO	% Retenido acumulado	% Que pasa acumulado
3/8 "	121,2	30%	30%	70%

4	233,5	58%	89%	11%
8	16,2	4%	93%	7%
16	1,5	0%	93%	7%
50	2,3	1%	94%	6%
100	1,8	0%	94%	6%
Fondo	23	6%	100%	0%

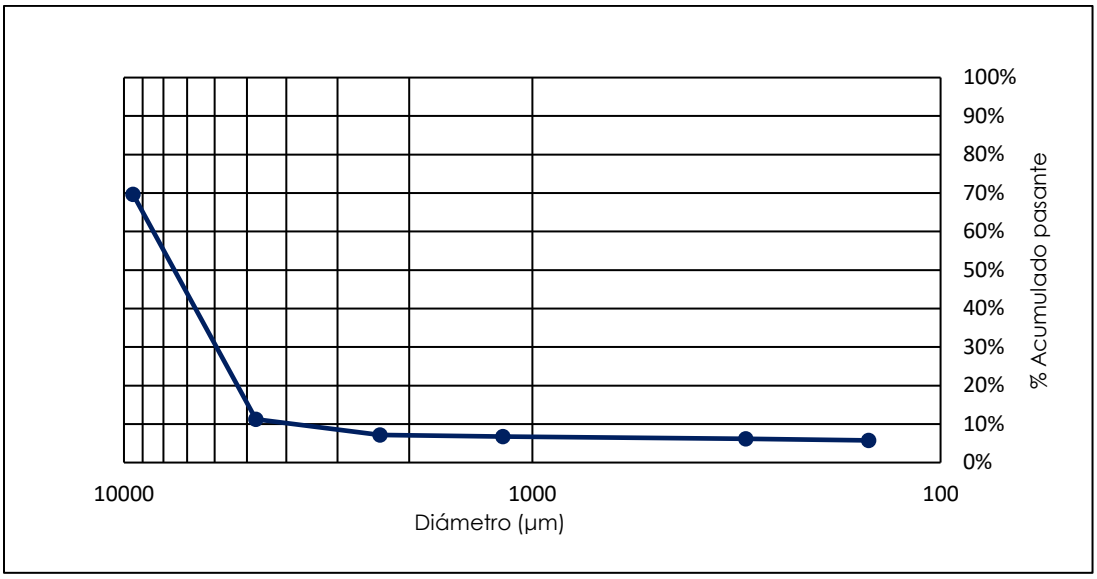

Figura 32. Distribución granulométrica de la piedra pómez

4.1.4 Parámetros de calidad del cemento

Para una muestra del cemento utilizado en este trabajo, y utilizando una relación A/C de 0,263 para una consistencia normal, en la Tabla 20 se presentan los resultados de las pruebas de calidad realizadas a este material, las cuales resultaron conforme a lo publicado por la empresa fabricante en la ficha técnica del producto, por lo que se puede descartar problemas debido a una mala calidad del cemento en los resultados obtenidos para las diferentes mezclas de morteros ensayadas, donde se utilizó este material.

Tabla 20. Resultados de ensayos de calidad del cemento

Parámetro	Valor promedio
Blaine (cm^2/g)	4810 ± 15
Fraguado inicial (min)	180
Fraguado Final (min)	240
% Expansión en autoclave	0,012 ± 0,011

4.2 Caracterización de concretos obtenidos a partir de mezclas con adiciones de CE

En la Figura 33 se muestran las densidades secas de las muestras curadas 28 días. Para el caso de la CE sin ningún beneficio, los resultados muestran que la densidad aumentó inicialmente a 1656 kg/m^3, cuando se adiciona un 5% de CE, puesto que dicha mezcla tiene la misma cantidad de MK que la mezcla patrón, más un 5% de CE, lo que significa una cantidad superior de material puzolánico neto. Pero, a medida que aumenta la cantidad de adición de CE, la densidad disminuye a 1400 y 1520 kg/m^3 para las muestras con un 10 y 15% de ceniza respectivamente, lo cual se da por la estructura porosa de las cenizas volantes (Bicer, 2018). Además, se aprecia que no hay un cambio en el valor de la densidad para la mezcla con un contenido de 20% de ceniza, frente a la mezcla patrón (1590 kg/m^3), lo cual es coherente si se tiene en cuenta que para estas dos mezclas no se tiene una combinación de CE y MK y los porcentajes de adición de cada una, en la mezcla respectiva, es similar y con un leve incremento del 4% en cuanto a cantidad de material puzolánico , lo que nos lleva a concluir, que para el caso de la ceniza sin ningún tratamiento físico-mecánico, se debe agregar mayor cantidad de CE como sustitución del cemento para obtener los mismos resultados que una mezcla que contiene menor sustitución de cemento por MK.

Por otra parte, cuando se hacen sustituciones de cemento por CE molida y seca en un 10 y 15%, hay un aumento en la densidad, en comparación con las muestras adicionadas con CE sin moler y MK, debido a que a medida que se reduce el tamaño de grano, las partículas completas reemplazan las partículas porosas y la densidad aumenta (Bicer, 2018), ya que al moler la cenizas volantes sus componentes internos, protegidos por una capa superficial vidriada bastante densa y químicamente estable, que son porosos, esponjosos, amorfos y por lo tanto más reactivos, quedan expuestos mejorando la acción puzolánica de la ceniza con el aumento del gel de silicato cálcico hidratado (CSH) y sulfoaluminato de calcio hidratado (etringita) en la mezcla de concreto (Hefni Y., 2018).

La norma ASTM C1670/ C1670M-16 para piedras prefabricadas en EE.UU, establece una resistencia a la compresión de 15 MPa a 28 días. De acuerdo a esta la norma, todas las mezclas con CE activada mecánicamente cumplen con la resistencia mecánica exigida, y para el caso de la las mezclas adicionada con CE sin ningún tipo de beneficio, solo cumplirían las que tienen un 5 y 10% de adición. Sin embargo, cabe destacar que para un tiempo de curado de 90 días la resistencia de todas las mezclas ensayadas con CE, activada mecánicamente o no, superan dicho valor en resistencia. Las adiciones puzolánicas con contenidos importantes de sílice y aluminio facilitan el retardo de la velocidad de fraguado del cemento al tener una reacción de hidratación con una liberación menor de calor (Barón & Mercado, 2012), reduciendo la resistencia a edades tempranas y limitando el uso de cenizas volantes en las mezclas con cemento (Irbe L., 2018), puesto que antes de 10 a 14 días no contribuye significativamente a la resistencia (Agudelo & Espinosa , 2017). Pero existe evidencia que los hormigones livianos de alto desempeño experimentan un proceso de curado interno, generado por el aporte de agua contenida en los poros del árido liviano a la hidratación del cemento, lo que favorecería también la reacción puzolánica, haciendo que a edades de curado como 90 días la resistencia del concreto sea mucho mayor, como en este caso (Videla & Tapia, 2007).

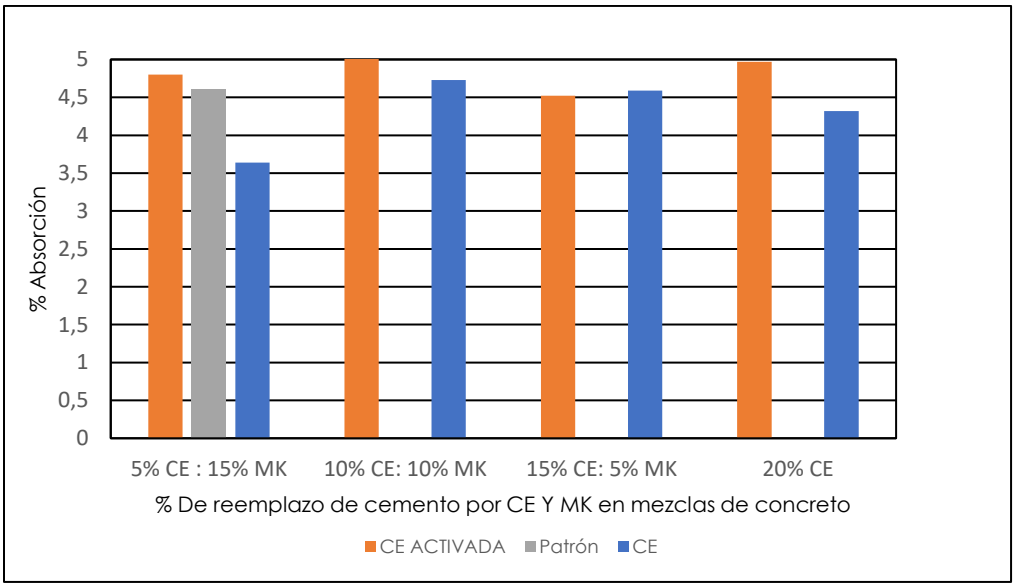

Figura 33. Resultados % de absorción promedio de las mezclas de concreto adicionada con CE y CE activada a 28 días de curado

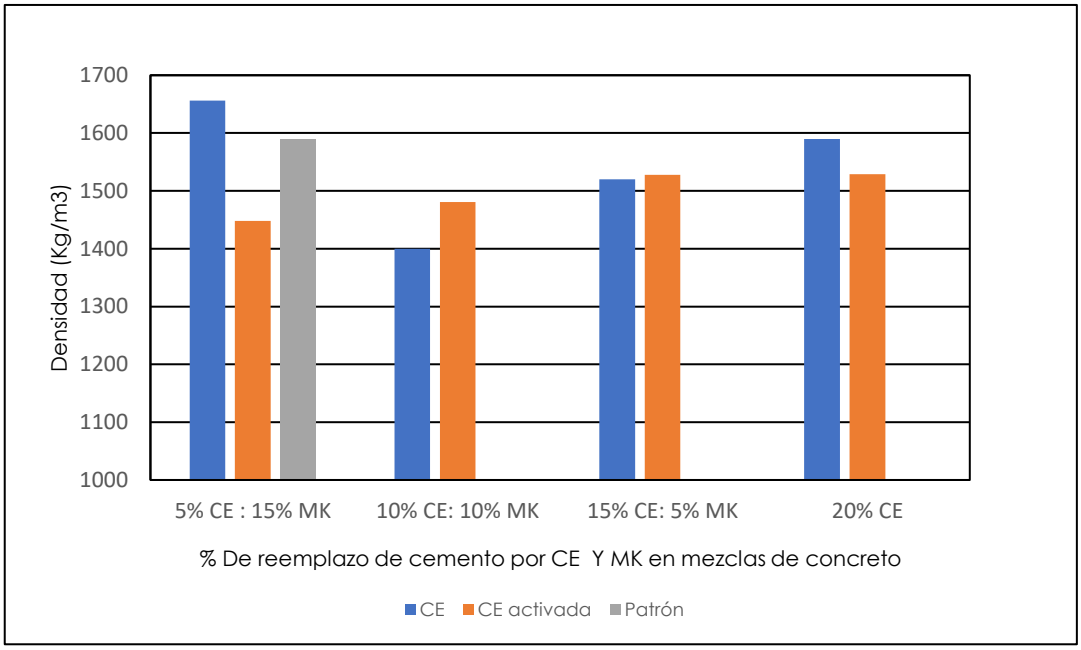

Figura 34. Resultados de densidades promedio de las mezclas de concreto adicionada con CE y CE activada a 28 días de curado

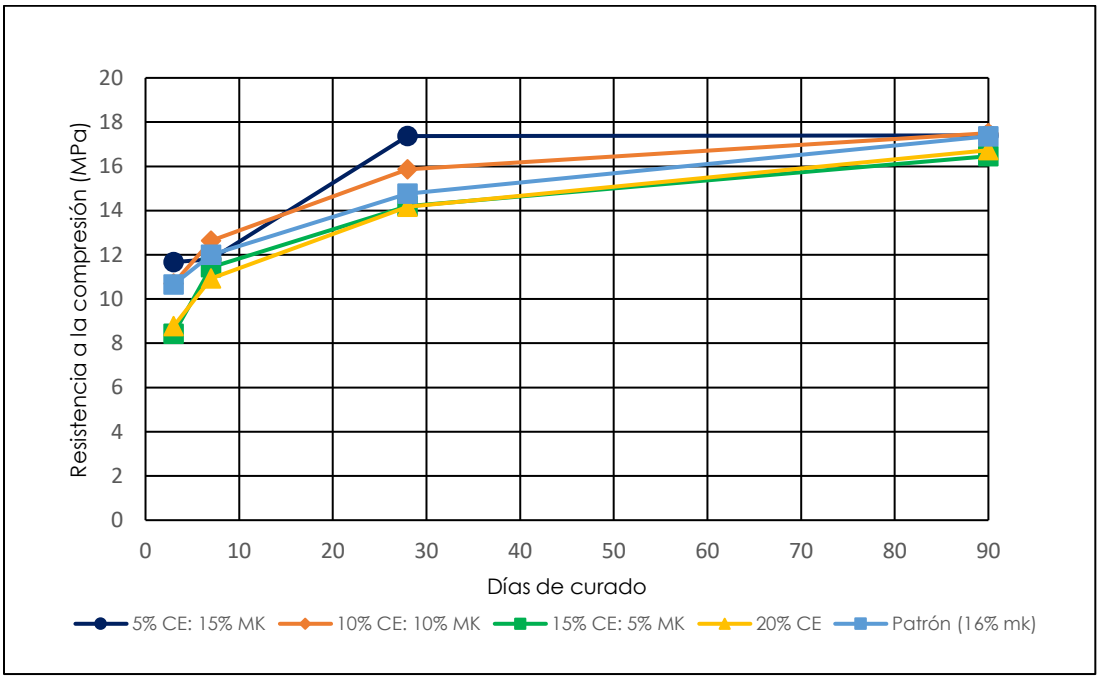

Figura 35. Resultados de resistencias a la compresión promedio de concretos adicionados con CE

Para el caso de las mezclas con adiciones de ceniza sin beneficio, a los 3 ,7, 28 y 90 días solo se ve un comportamiento positivo en la resistencia a la compresión para las mezclas con 5 y 10% de sustitución, donde la resistencia, se mantiene igual que el patrón o aumenta con respecto a este. En cambio para las mezclas con CE activada y 7 días de curado, solo se ve un incremento en la resistencia a la compresión para las mezclas con 10, 15 Y 20% de sustitución, mientras que no hay variación para las mezclas con un 5% de CE.

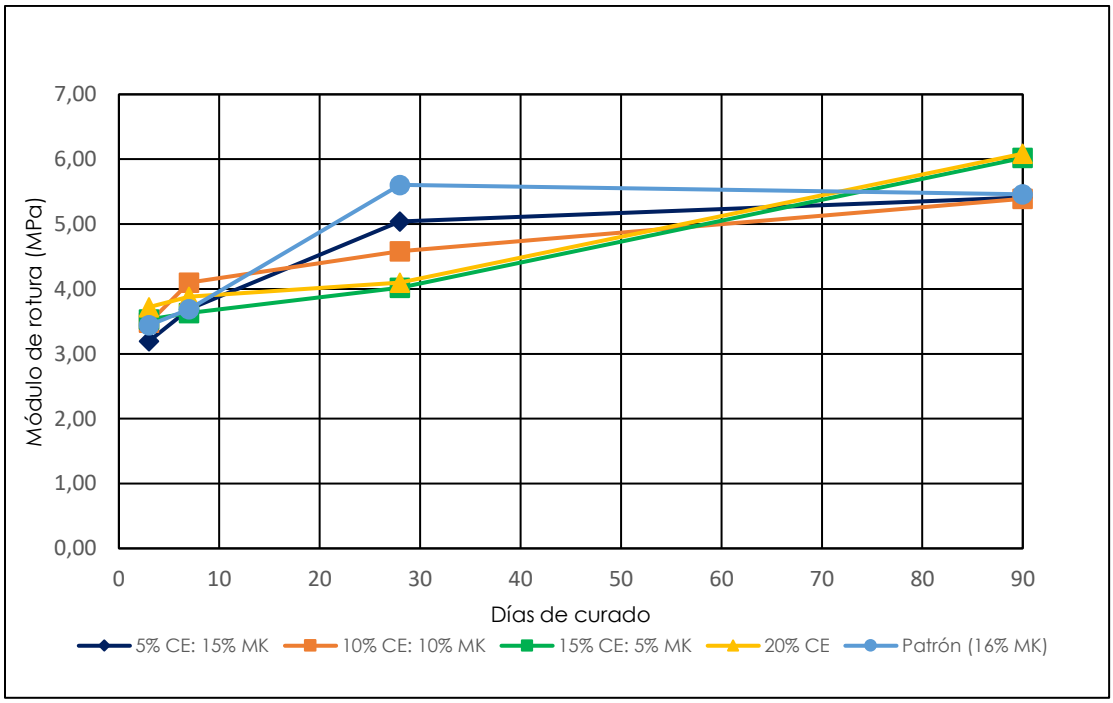

Figura 36. Resultados de resistencias a la flexotracción promedio de concretos adicionados con CE

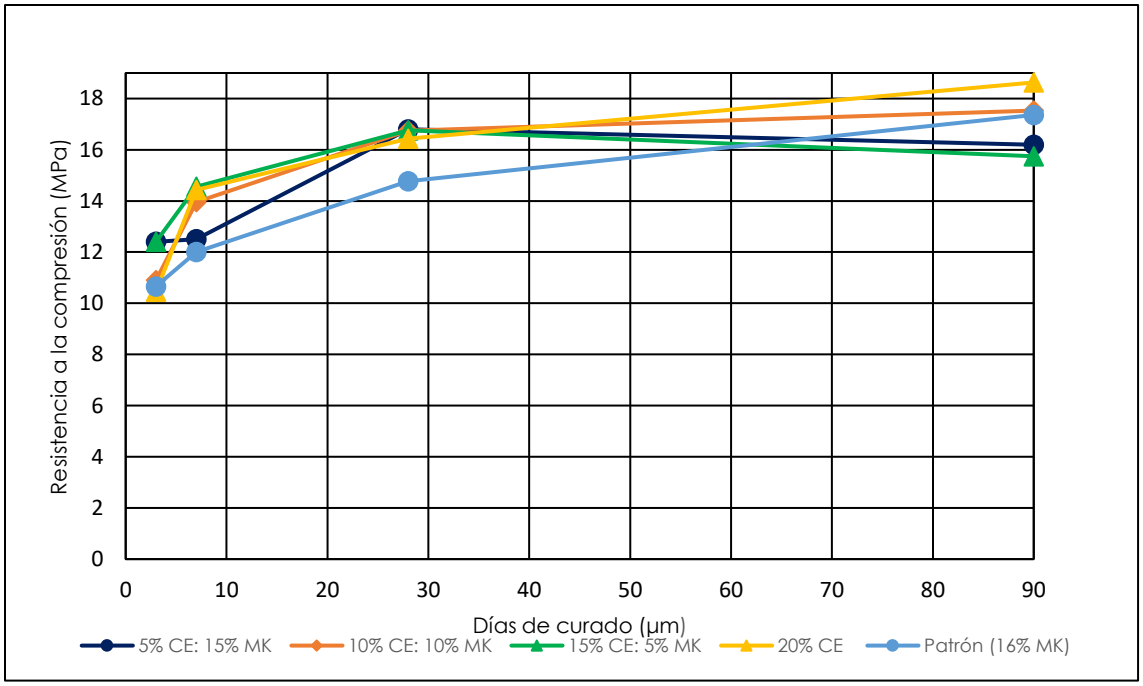

Figura 37. Resultados de resistencias a la compresión promedio de concretos adicionados con CE activada mecánicamente

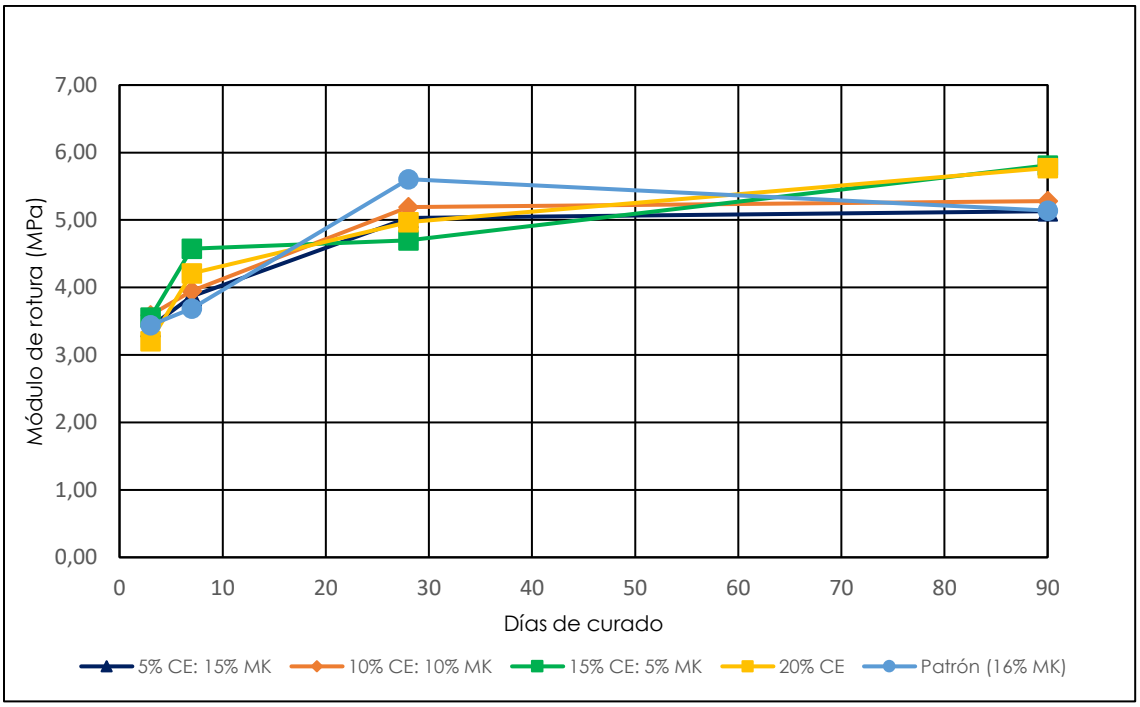

Figura 38. Resultados de resistencias a la flexotracción promedio de concretos adicionados con CE activada mecánicamente

4.2.2 Características de los materiales cerámicos obtenidos a partir de pastas cerámicas con adiciones de CE

La Figura 39 muestra cómo se comporta el porcentaje de contracción de sinterizado de la pasta actualmente usada en Eurocerámica, al aumentar la cantidad de CE en la formula. En esta se puede observar que al adicionar un 1% de CE a la pasta cerámica, el porcentaje de contracción disminuye levemente frente a la muestra patrón que tiene un porcentaje de contracción de 3,39%, pero al aumentar el porcentaje de adición de CE al 3 y 5%, dicha propiedad aumenta a 3,52 y 3,61%. Este comportamiento puede darse al aumentar la cantidad de feldespato en la pasta, si tenemos en cuenta que esta ceniza posee un 68,74% de Anortita como fase cristalina, la cual pertenece a la familia de estos minerales. Los feldespatos actúan como desgrasantes mejorando la compacidad y permeabilidad de las piezas conformadas, y una mejor compacidad provoca la disminución de las pérdidas por calcinación y por tanto la contracción de cocción y de la porosidad de las piezas cocidas

a temperaturas bajas a las que aún no se ha producido de forma apreciable la fusión de los feldespatos (Barba A., 1997), lo que se comprueba si observamos las Figura 40 y 41, donde en general al aumentar el porcentaje de CE en la pasta la absorción y el %P.P.I disminuye . Cabe destacar que la compacidad aumenta hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual la presencia de mayores contenidos en partículas de desgrasantes originará una disminución de compacidad (Barba A., 1997) y por ende un aumento en la contracción, lo cual explica el aumento de esta propiedad en los materiales cerámicos hechos con un 3 y 5% de adición de CE a la pasta, incluso sobrepasando la muestra patrón.

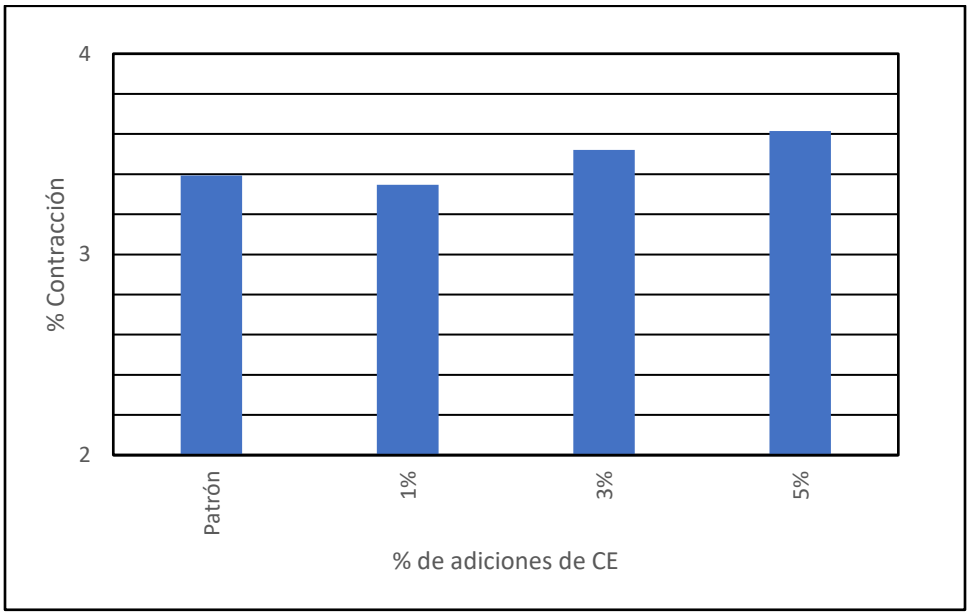

Figura 39. Resultados de Porcentajes de contracción promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a 1140°C

Por otra parte, los porcentajes de absorción obtenidos para los materiales fabricados a partir de las diferentes formulaciones y quemados a 1140°C, disminuyeron con referencia al patrón, pero sobrepasaron ligeramente el valor máximo permitido por la norma NTC 919 para baldosas cerámicas prensadas en seco pertenecientes al grupo BII_b que es 10%, aunque ninguno de los especímenes

ensayados, de las diferentes formulaciones, superó el 11% que es el valor máximo individual. Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la flexión y módulo de rotura (Figura 40 y 41), concuerdan con los resultados de absorción, ya que la mayor resistencia a la flexión obtenida fue para la pasta hecha con un 5% de CE con 1485,22 N y un módulo de rotura de 30,67 MPa, la cual tiene uno de los porcentajes de absorción más bajos con respecto al patrón. Un aumento en la cantidad de Anortita (feldespato), presente en la CE, aumenta la resistencia mecánica, disminuyendo de este modo el riesgo de roturas, incluso durante todas aquellas etapas en las que las piezas se manipulen (Barbas et al., 1997).

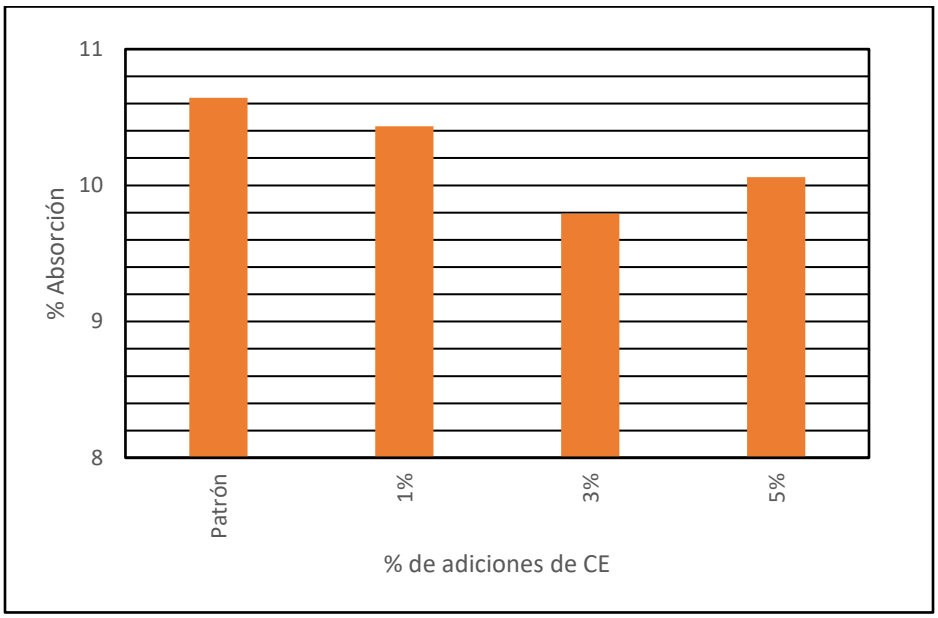

Figura 40. Resultados de Porcentajes de absorción promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a 1140°C

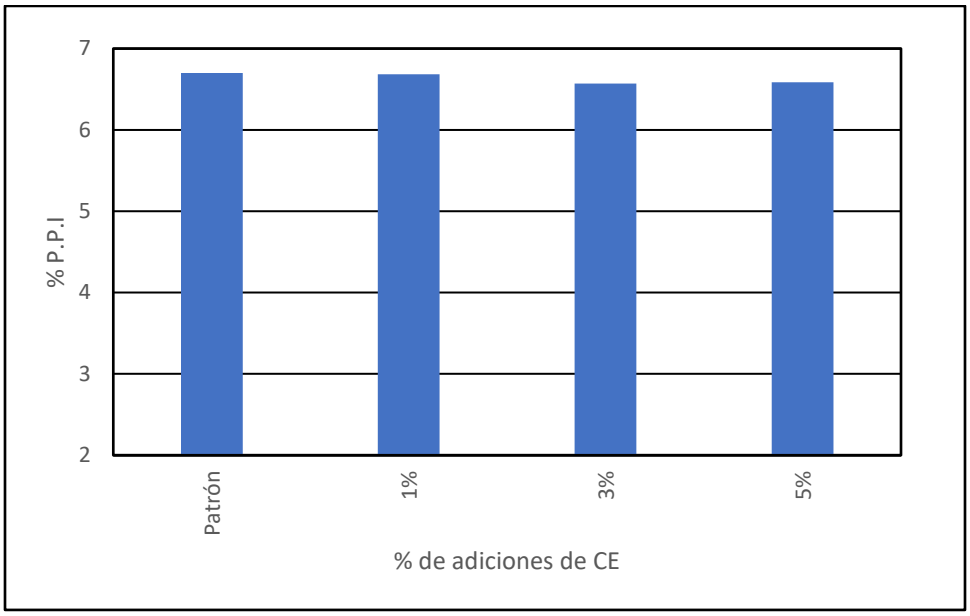

Figura 41. Resultados de Pérdidas por ignición promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a 1140°C

Por el contrario, la resistencia a la flexión más baja fue la de la muestra patrón, la cual tiene también el porcentaje de absorción más alto, 10,64%, lo cual era de esperarse ya que la presencia de más poros en la muestra compactada en verde, debido a una menor compacidad al tener menos feldespato en su composición, puede limitar el crecimiento eficiente del grano en la etapa de cocción por lo que se dará una pobre densificación en el sinterizado (Ebadzadeh, 2003). Dado que la ceniza es un material no plástico, la tasa de aumento de la resistencia de la baldosa es mayor cuando el contenido de cenizas volantes aumenta.

En general los valores obtenidos tanto para resistencia a la flexión como módulo de rotura, de todos los materiales hechos con las pastas cerámicas adicionadas con CE en un 1, 3 y 5%, cumplen con los requisitos de la NTC 919 para el grupo BII_b.

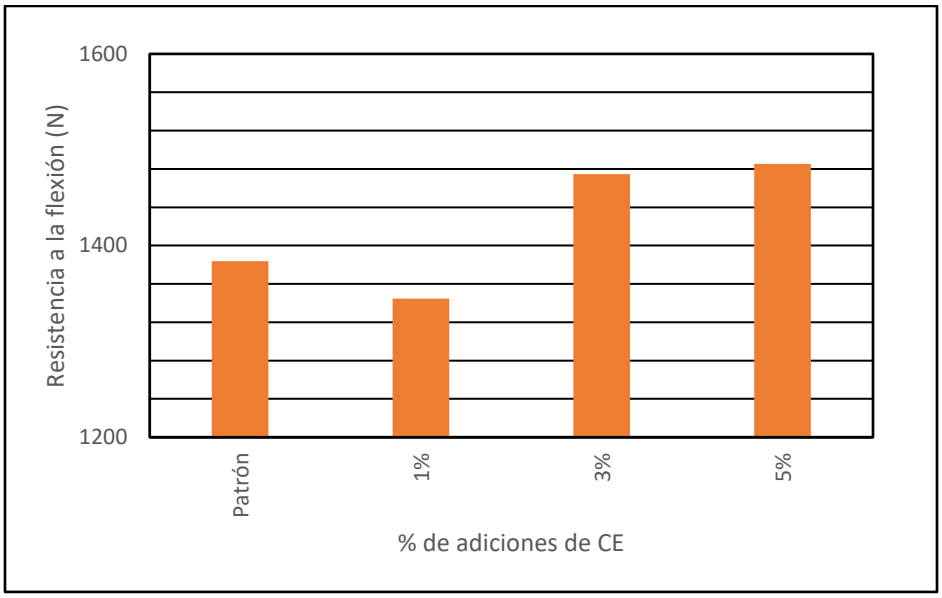

Figura 42. Resultados de Resistencias a la flexión promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a 1140°C

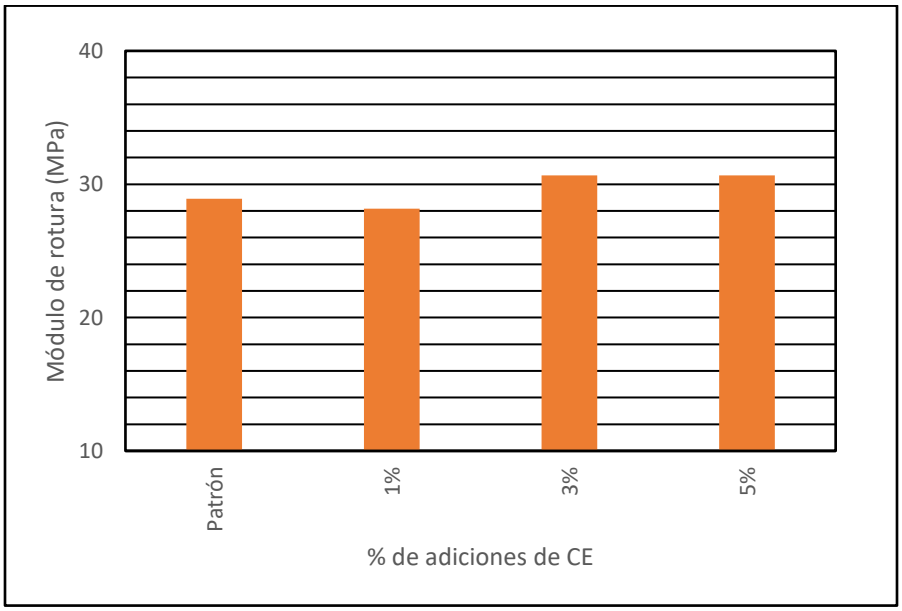

Figura 43. Resultados de módulos de rotura promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a 1140°C

Finalmente, para determinar la influencia de la temperatura de cocción en las propiedades físicas de los materiales cerámicos obtenidos, se quemaron materiales obtenidos con las diferentes pastas

formuladas a una temperatura de 1115, 1140, 1165 y 1185°C, y los resultados se muestran en la Figura 44 y 45. La cocción a mayor temperatura de las piezas cerámicas significó un aumento en el tiempo de residencia de estas en el horno, lo cual retarda la cristalización y proporciona más oportunidad para el flujo viscoso, (Ebadzadeh, 2003, p. 56-61) el cual bajo las fuerzas de tensión superficial creadas por los finos poros de la pieza, tienden a acercar las partículas, aumentando la contracción y disminuyendo la porosidad abierta (Barba et al., 1997, p. 259). En la Figura 43 se puede observar que el sinterizando las piezas a 1115°C la contracción es mayor comparado con los resultados obtenidos para una cocción a 1185°C y que al aumentar la cantidad de ceniza la variación de estos parámetros es mayor con la temperatura. Esto debe suponer también un aumento en la resistencia a la flexión de las probetas al aumentar la temperatura de sinterizado, ya que la absorción también disminuye al aumentar la temperatura de cocción para cualquiera de las mezclas como era de esperarse, debido a que la compleja reacción de disociación de los retículos arcillosos, que parte de los flujos vítreos hasta formar un tejido compacto, está controlada por la energía térmica aportada durante la fase de cocción, y el aumento en la fundencia de la pasta al agregar feldespato (Asociación Española de Técnicos Cerámicos, 2004, p. 333). Cabe destacar que para temperaturas mayores a 1050°C se garantiza que se ha iniciado la formación de mullita (Sahnoune, Chegaar, Saheb, Georiot, y Valdicieso, 2008, p. 304-310), la cual es una fase termodinámicamente estable en el sistema SiO2-Al2O3 (Chen, Lan, y Tuan, 2000, p. 219-2525) que aporta a las propiedades mecánicas del material, y que a 900°C el material apenas está en su etapa inicial de formación de la fase liquida (Semiz, 2017, p. 83-93).

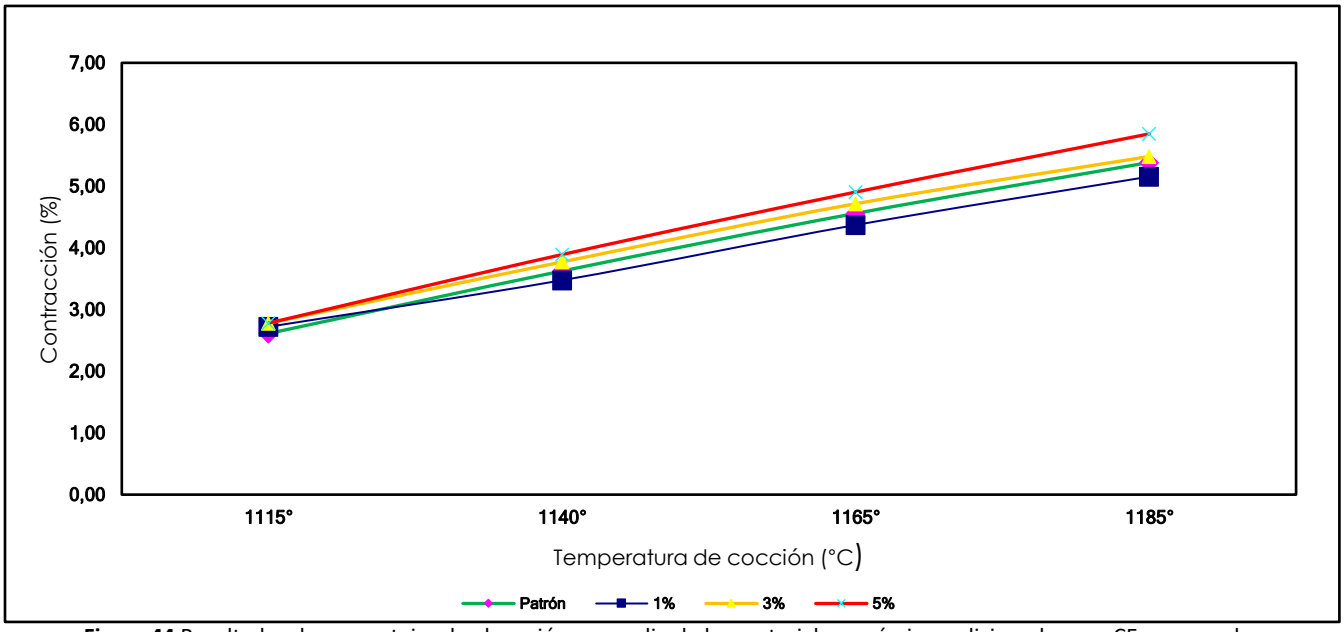

Figura 44 Resultados de porcentajes de absorción promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a diferentes temperaturas

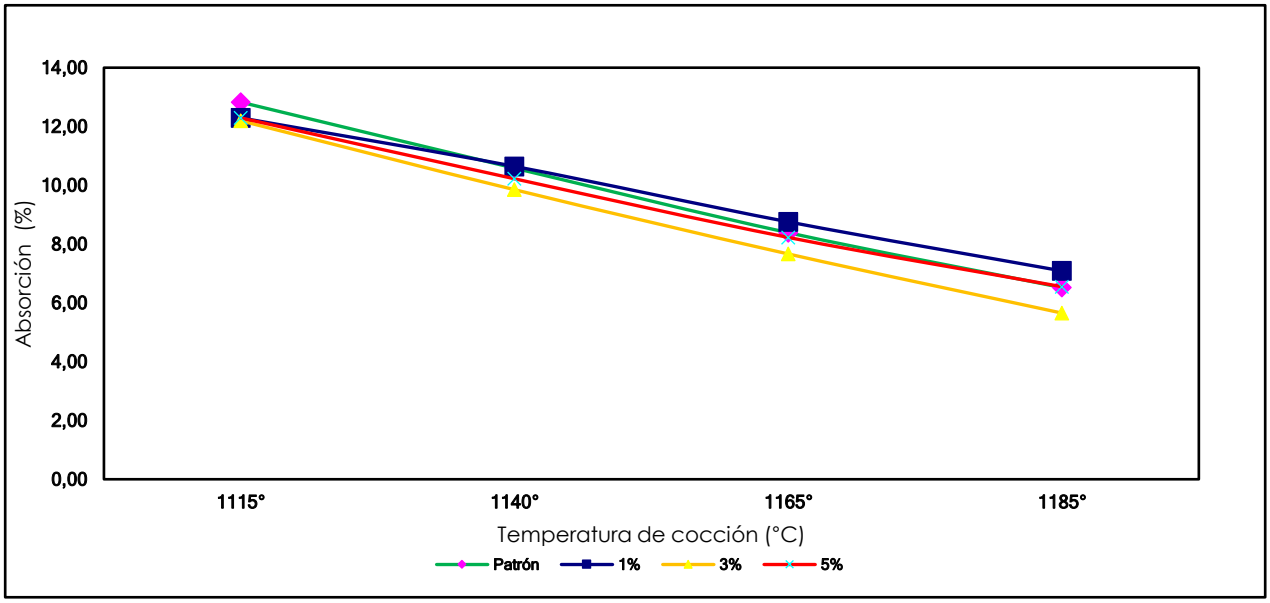

Figura 45. Resultados de porcentajes de contracción promedio de los materiales cerámicos adicionados con CE y quemados a diferentes temperaturas

5. CONCLUSIONES

La CE obtenida de la quema de carbón, como combustible, en el proceso de atomización para el secado de la barbotina en una planta de pisos cerámicos, puede aumentar su gravedad específica desde un 2,02 hasta 2,44 luego de ser sometida a un proceso de molienda, lo cual incrementa su reactividad cuando es usada como sustitución de cemento en concretos livianos.

Para poder ser utilizada en concreto la CE debe pasar por un proceso de molienda de 2 horas, obteniéndose un retenido en malla N°325 después del tamizado húmedo de 0,38% y un módulo de finura de 0,001, cumpliendo así uno de los requisitos de la NTC 3493 (NTC 3493, 2017), la cual exige un porcentaje máximo de retenido en el N°325 de 35% . Además, con el proceso de molienda se obtiene un material con una distribución de partículas (función de frecuencia normalizada continua de porcentajes retenidos acumulados por unidad de tamaño de partícula) sesgada hacia los tamaños entre 2 y 20 µm, mientras que para la CE sin activación mecánica la distribución es totalmente asimétrica y se encuentra totalmente sesgada hacia los tamaños más gruesos, mayores a 60 µm.

La ceniza obtenida de la quema de un combustible líquido obtenido de la molienda de carbón subbituminoso se compone de partículas irregulares con texturas superficiales ásperas y porosas (esfera vesicular) Y formas esponjosas de CE, acompañadas de partículas más pequeñas con forma esférica, lo que indica una alta posibilidad de combinarse fácilmente con otras sustancias, y compuestas de 3 fases cristalinas, Cuarzo (SiO2), Mullita ($Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-X}$;(X~0,4)) y Anortita (CaAl2Si2O8) mayoritariamente. Adicionalmente se encontró que este tipo de cenizas conservan un alto porcentaje de carbono en la muestra, el cual está asociado al carbón inquemado debido a un proceso de combustión ineficiente en el quemador.

La CE analizada se puede clasificar como como una ceniza volante Tipo F según la NTC (NTC

3493, 2017), debido a que la suma de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ es mayor al 70% (86,87%), tiene un contenido de SO_3 menor al 5% y un % P.P.I < 6 (1,1%). Por otro lado, la CE se puede clasificar como una ceniza bituminosa dado que $\%Fe_2O_3 > \%CaO + \%MgO$.

Al adicionar CE sin moler a mezclas de concreto, se obtiene un incremento de la densidad hasta 1656 kg/m^3 cuando se adiciona un 5% de CE y se conserva la cantidad de MK que tiene la mezcla patrón, pero la densidad disminuye a medida que aumenta la cantidad de CE en la mezcla debido a la estructura porosa de las cenizas volantes (Bicer, 2018). Para el caso donde no se combina el MK y la CE sin moler, se debe agregar se debe agregar mayor cantidad de CE como sustitución del cemento para obtener los mismos resultados que una mezcla que contiene menor sustitución de cemento por MK.

Por otra parte, cuando se hacen sustituciones de cemento por CE molida y seca, al aumentar el porcentaje de CE hay un aumento en la densidad, en comparación con las muestras adicionadas con CE sin moler y MK, debido a que a medida que se reduce el tamaño de grano, las partículas completas reemplazan las partículas porosas y la densidad aumenta (Bicer, 2018).

Todas las mezclas con CE activada mecánicamente cumplen con la resistencia mecánica mayor a 15 MPa a 28 días, exigida por la norma ASTM C1670/ C1670M-16 para piedras prefabricadas en EE. UU, y para el caso de la las mezclas adicionadas con CE sin ningún tipo de beneficio, solo cumplirían las que tienen un 5 y 10% de adición. Sin embargo, si se tiene en cuenta la aplicación de concretos livianos para prefabricados con procesos de desencofrados menor a 24 horas, la resistencia a edades tempranas se vuelve fundamental, por lo que en este caso las mezclas ideales con CE activada mecánicamente serían solamente las que tienen un 10, 15 y 20% de CE.

El uso de la CE como adición en la formulación de la pasta para la producción de baldosas cerámicas sinterizadas a a1140°C, arrojó piezas con menor porcentaje de absorción y por ende más resistentes a medida que se aumenta el porcentaje de CE en la formula, debido a la cantidad de

feldespato en la pasta, si tenemos en cuenta que esta ceniza posee un 68,74% de Anortita, lo cual aumenta la compacidad en la conformación de las piezas en verde y disminuye los poros. En general los valores obtenidos tanto para resistencia a la flexión como módulo de rotura, de todos los materiales hechos con las pastas cerámicas adicionadas con CE en un 1, 3 y 5%, cumplen con los requisitos de la NTC 919 para el grupo $BII_{b.}$, pero considerando la contracción como una propiedad fundamental en el proceso de quemado solo con la mezcla con una adición de 1% de CE se obtiene una disminución del porcentaje de contracción levemente frente a la muestra patrón que tiene un porcentaje de contracción de 3,39%.

Finalmente, se determinó que, para un mismo porcentaje de adición de CE, al quemar las piezas a mayor temperatura la contracción disminuye, siendo más significativa la disminución en porcentajes más altos de adición de la CE. De igual manera el porcentaje de absorción disminuye al aumentar la temperatura de cocción, obteniéndose mejores resultados cuando se tiene una adición intermedia del 3%.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(s.f.). Recuperado el 22 de Octubre de 2018, de http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo3.pdf

Abbas, S., Saleem, M., Kazmi, S., & Munir, M. (2017). Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties. *Journal of Building Engineering, 14*, 7–14. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Agudelo, A., & Espinosa , B. (2017). *ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA.* Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Ahmaruzzaman, M. (Junio de 2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and combustion Sciene, 36*(3), 327-363.

Aineto, M., Acosta, A., & Iglesias, I. (2006). The role of a coal gasification fly ash as clay additive in building ceramic. *Journal of the European Ceramic Society, 26*, 3783–3787. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Álvarez, D. (2014). Evaluación de la densidad y la resistencia a la compresión de bloques de concreto con sustitución del agregado de piedra por desechos de la industria del papel. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Álvarez, D. (2014). *Evaluación de la densidad y la resistencia a la compresión de bloques de concreto con sustitución del agregado de piedra por desechos de la industruia de papel.* Universidad EAFIT, mEDELLÍ.

American Society for Standard Materials and Testing. (2011). *ASTM C311. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.* Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

American Society for Testing and Material. (2018). ASTM C191-Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C109Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Recuperado el 7 de Noviembre de 2018

American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C430-17-Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve.* Recuperado el 3 de Noviembre de 2018

American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C204-18-Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018

American Society for Testing and Materials. (2018). ATM C114-18-Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018

American Society Standard for Materials and Testing. (2016). *ASTM C1670. Standard Specification for Adhered Manufactured Stone Masonry Veneer Units.* Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

ASTM International. (2012). ASTM C125 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Recuperado el 23 de Agosto de 2018, de www.compass-astm.org

ASTM International. (2014). *C567, Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweigth Concrete.* Recuperado el 11 de Septiembre de 2018

ASTM International. (2017). ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Recuperado el 23 de Agosto de 2018

Barba A., F. C. (1997). *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas* (1 ed.). Castellón, España. Recuperado el 15 de Octubre de 2018

Barón , O., & Mercado, Y. (2012). *Efectos de la Sílice Coloidal en las Propiedades en Estado Fresco y Endurecido del Mortero y Concreto Hidráulico.* Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Recuperado el 16 de Noviembre de 2018

Bicer, A. (2018). Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ashcement. *Thermal Science and Engineering Progress*. doi:https://doi.org/10.1016/j.tsep.

Braz, G., Marques, S., Guerra, A., Fonseca, J., Franca, F., Silva, S., & Delgado, A. (2017). Mechanical properties and microstructure of high performance concrete containing stabilized nano-silica. *Matéria, 22*(2), 1517-7076. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.scielo.com

Brown P., J. T. (2011). The internal microstructure and fibrous mineralogy of fly ash from coal-burning power stations. *Environmental Pollution, 159*, 3324-3333. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Calleja, J. (1968). Las puzolanas. *ION, 29 Y 30*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018

Camilo Chávez, Y. G. (2015). Obtenido de http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9685/ChavezCamilo2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carvajal, J. (2012). *EVALUACIÓN DE ESCORIAS DE CÓRDOBA PARA SU UTILIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO PÓRTLAND.* Tesis Maestría, Medellín. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018

Castellanos, A., Mawson, H., Burke, V., & Prabhakar, P. (2017). Fly-ash cenosphere/clay blended composites for impact resistant tiles. *Construction and Building Materials, 156*, 307–313. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Castillo, R., Antoni, M., Alujas, A., Scrivener, K., & Martirena, J. (2011). Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. *Revista Ingeniería de Construcción, 26*(1), 25-40. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.scielo.com

Chysanthi, E., & Stefanidou, M. (2018). Application of an alternative way for silica fume dispersion in cement pastes without ultrasonication. *Cement and Concrete Research, 115*, 59–69. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Consoli N., G. d. (2014). Coal fly ash–carbide lime bricks: An environment friendly building product. *Construction and Building Materials, 69*, 301-309. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Crespo, R. M. (2015). *Incorporación de escorias de aluminio en la fabricación de productos de arcilla cocida.* Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Cubaud, U., & Murat, M. (1969). fabricación industrial de arcilla expandida. *Materiales de Construcción , 19*(133). Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Cultrone, E., & Sebastián, G. (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials, 23*, 1178–1184. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Dopico, J., Martirena, F., Day, R., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martinez, L. (2008). Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Revista Ingeniería de Construcción, 23*(3), 171-178. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.scielo.com

Ebadzadeh. (2003). Formation of mullite from precursor powders: sintering, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering, 355*, 56-61. Recuperado el 15 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Enrrique, J., & Amorós, J. (1985). *Tecnología cerámica. Introducción a la tecnología cerámica.* Instituto de Química Técnica. Uniersidad de Valencia.

Felix, E., & Possan, E. (2018). Balance emissions and CO2 uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. *IBRACON Structures and Materials Journals, 11*(7), 135-162. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.scielo.com

Galán, E., & Aparicio, P. (s.f.). *Materias primas para la industria cerámica.* Universidad de Sevilla. Recuperado el 24 de Noviembre de 2018, de http://www.ehu.eus/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf

Gang X., X. S. (2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation & Recycling, 136*, 95-109. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Gang Xu, X. S. (Abril de 2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction. *Resources, Conservation & Recycling*, 95-109. Recuperado el 1 de Julio de 2018, de www.sciencedirect.com

Gao Y., H. C. (2018). Investigation on microstructure and microstructural elastic properties of mortar incorporating fly ash. *Cement and Concrete Composites, 86*, 315-321. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018

Giraldo, O. (1987). *Guía práctica para el diseño de hormigón.* Medellín: Universidad Nacional sede Medellín.

Golewski, G. (2017). Improvement of fracture toughness of green concrete as a result of addition of coal fly ash. Characterization of fly ash microstructure. *Materials Characterization, 134*, 335–346. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Golewski, G. L. (2018). Effect of curing time on the fracture toughness of fly ash concrete. *Composite Structures*, 105-112. Recuperado el 1 de Julio de 2018, de www.sciencedirect.com

Grupo Argos S.A. (s.f.). *Reporte de Calidad de cemento uso estructural-Cementos Argos-Planta Rioclaro.*

Guerrero, D., & Chaves, D. (2013). *Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto simple utilizando ceniza como porcentaje del cemento.* Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil , Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, Bucaramanga. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018

Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.actoscolombia.org.co/wp-content/uploads/2018/03/ELCONC1.pdf

Hefni Y., A. E. (2018). Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials, 172*, 728-734. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Hemalatha T., R. A. (25 de Enero de 2017). A review on fly ash characteristics -Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production, 147*, 546-559. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Hermann, A., Langaro, E., Lopes, S., & Klein, N. (2016). Particle packing of cement and silica fume in pastes using analytical model. *IBRACON Structures and Material Journals, 9*(1), 48-65. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Howera J., G. J.-V. (2017). Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review. *International Journal of Coal Geology, 179*, 11-27. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Irbe L., U. L. (2018). Coal fly ash activation—Comparison of isothermal calorimetric data and mortar strength. *Thermochimica Acta, 659*, 151-156. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Ji, R., Zhang, Z., Yan, C., Zhu, M., & Li, Z. (2016). Preparation of novel ceramic tiles with high Al2O3 content derived from coal fly ash. *Construction and Building Materials, 114*, 888–895. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Karayannis, V., Moutsatsou, A., Domopoulou, E., Katsika, E., Drossou, E., & Baklavaridis, A. (2017). Fired ceramics 100% from lignite fly ash and waste glass cullet mixtures. *Journal of Building Engineering, 14*, 1–6. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Kim T., D. J. (2018). Fly ash particle characterization for predicting concrete compressive strenght. *Construction and Building Materials, 165*, 560-571. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de www.sciencedirect.com

Kockal, N. (Agosto de 2015). Optimizing production parameters of ceramic tiles incorporating fly ash using response surface methodology. *Ceramics international, 41*(10), 14529-14536.

Leonardo Velásquez, J. D. (Diciembre de 2007). Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión del carbón. *Revista Energética*(38).

Lingling, X., Wei, G., Tao, W., & Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials, 19*, 243–247. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018

Liwu Mo, L. L. (Junio de 2018). Influence of fly ash and metakaolin on the microstructure and compressive. *Cement and Concrete Research*, 116-129. Recuperado el 1 de Julio de 2018, de www.sciencedirect.com

Luo, Y., Zheng, S., Ma, S., Liu, C., & Wang, X. (Octubre de 2017). Ceramic tiles derives from coal fly ash: Preparation and mechanical characterization. *Ceramics International, 43*(15), 11953-11966. Recuperado el 1 de Febrero de 2018, de www.sciencedirect.com

Luo, Y., Zheng, S., Ma, S., Liu, C., & Wang, X. (2018). Preparation of sintered foamed ceramics derived entirely from coal fly ash. *Construction and Building Materials, 163*, 529–538. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Medina, A. (2010). *www.bdigital.unal.edu.co.* Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/2022/1/43569660.2010.pdf

Moffatt, E., & Thomas, M. (2018). Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment. *Cement and Concrete Research, 113*, 65–73. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Norma Técnica Colombiana. (2001). *NTC 3459. Agua para la elaboración de concretos.* Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Norma Técnica Colombiana. (2015). *NTC 919. Baldosas Cerámicas. Definiciones, clasificación, caratcerísticas y rotulado.* ICONTEC. Recuperado el 24 de Noviembre de 2018

Norma Técnica Colombiana. (2019). *NTC 4045, Concretos. Agregados livianos para concreto estructural.* ICONTEC. Recuperado el 10 de Septiembre de 2018

Normas y especificaciones INVIA . (2012). *INV E-202-13, Reducción de muestras por cuarteo .* Recuperado el 9 de Septiembre de 2018

Normas y especificaciones INVIAS. (2012). *INV E-123-13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.* Recuperado el 27 de Septiembre de 2018

Normas y Especificaciones INVIAS. (2012). *INV E 128-13 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.* Recuperado el 27 de Septiembre de 2018

Normas y especificaciones INVIAS. (2012). *INV E-217-13, Densidad Bulk (Peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.* Recuperado el 11 de Septiembre de 2018

Normas y especificaciones, INVIA. (2012). *INV E-213-13, Análisis Granulométrico delos agregados grueso y fino.* Recuperado el 9 de Septiembre de 2018

Normas y Especificacones INVIAS. (2012). *INV E-222-13. Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino.* Recuperado el 13 de Octubre de 2018

NTC 107. (2019). *Método para determinar la expansión en autoclave del cemento portland.* Colombia: ICONTEC, Ed. Recuperado el 20 de Abril de 2021

NTC 110. (2019). *Método para determinar la consitencia normal del cemento hiráulico normal.* Colombia: ICONTEC, Ed. Recuperado el 20 de Abril de 2021

NTC 118. (2019). *Método para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat .* Colombia: ICONTEC, Ed. Recuperado el 20 de Abril de 2021

NTC 33. (2019). *Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato de blaine de permeabilidad al aire.* Colombia: ICONTEC, Ed. Recuperado el 04 de Abril de 2021

NTC 3493. (2017). *Cenizas volantes y puzolanas naturales calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto.* Recuperado el 1 de Octubre de 2018

NTC 4321-3. (18 de Noviembre de 2015). Baldosas cerámicas. Parte 3: Método de ensayo para determinar la absorción de agua, porosidad aparente, densidad relativa aparente y densidad aparente. (ICONTEC, Ed.) Colombia. Recuperado el 14 de Septiembre de 2018

NTC 4321-4. (18 de Noviembre de 2015). Baldosas cerámicas. Parte 4: Método de ensayo para determinar el módulo de rotura y la resistencia a la flexión. (ICONTEC, Ed.) Colombia. Recuperado el 18 de Septiembre de 2018

Restrepo .J, R. O. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *Dyna*(50), 131-141. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018

Rivera, G. (s.f.). *Concreto Simple.* Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Ruiz W., L. M. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Rev. Investig. Desarro. Innov, 8*(1), 135-146. doi:10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374

S. Sujjavanich, P. S. (2017). Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. *Construction and Building Materials, 155*, 830-837.

Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 25-31. Recuperado el 1 de Julio de 2018, de www.sciencedirect.com

Sokolar, R., & Vodova, L. (2011). The effect of fluidized fly ash on the properties of dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body. *Ceramics International, 37*, 2879–2885. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Speight, J. (2005). *Handbook of Coal Anlysis* (Vol. 166). Wiley-Interscience. Recuperado el 9 de Noviembre de 2018

Suárez A., U. M. (2010). *Caracterización de la ceniza volcánica del Tungurahua para la fabricación de un aglomerante Cal-puzolana.* Trabajo de grado, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018

Suárez I., V. B.-K. (2017). Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III.). *International Journal of Coal Geology, 183*, 188-203. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Sumicol, Corona. (2017). *Ficha técnica Fortacret 10.* Recuperado el 16 de Septiemnre de 2018

Toniolo N., y. B. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International, 43*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Torres J, G. R. (2011). Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 31 (1)*, 35-43. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018

Torres, H. (2014). *Valoración de propiedades mecánicasy de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho.* Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018

Trusilewicz, L. (2014). *Determinación del contenido de alúmina reactiva de las adiciones uzolánicas naturales y artificiales, por termogravimetría y por el método de Rietveld.* Tesis doctoral, Madrid. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (s.f.). *Caracterización de Carbones.* Recuperado el Noviembre de 2018

Valderrama C., T. J. (Abril de 2011). Características de dDesempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados. *Ingeniería e investigación, 31*(1), 39-46. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de http://www.scielo.org.co

Videla, C., & Tapia, P. (2007). Efecto del secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones livianos estructurales. *Revista Ingeniería de Construcción, 22* (2), 123-137.

Wagner, J., Matjie, R., Slaghuis, J., & van Heerden, J. (s.f.). Characterization of unburned carbon present in coarse gasification ash. *Fuel*(87), 683–691. Recuperado el 9 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Wang, H., Zhu, M., Sun, Y., Ji, R., Liu, L., & Wanga, X. (2017). Synthesis of a ceramic tile base based on high-alumina fly ash. *Construction and Building Materials, 155*, 930-938. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Wang, S., Zhang, C., & Chen, J. (2014). Utilization of Coal Fly Ash for the Production of Glass-ceramics With Unique Performances: A Brief Review. *Journal of Materials Science & Technology, 30*(12), 1208-1212. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Z.T. Yao X.S. Ji, P. S. (Febrero de 2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews, 141*, 105-121. Obtenido de www.sciencedirect.com

Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials – A review. *Construction and Building Materials, 47*, 643–655. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com

Zimmer, A., & Bergmann, C. (2007). Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material. *Waste Management , 27*, 59-68. Recuperado el 24 de Noviembre de 2018, de www.sciencedirect.com