

ESTUDIO DEL ESTADO FRESCO DE LA MEZCLA DE MORTERO CON
CENIZAS DE CALDERA TRATADAS FÍSICAMENTE DEL SECTOR
AZUCARERO

Realizado por
RODRIGO PEREZ DENHEZ

CALI
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
2014

ESTUDIO DEL ESTADO FRESCO DE LA MEZCLA DE MORTERO CON
CENIZAS DE CALDERA TRATADAS FÍSICAMENTE DEL SECTOR
AZUCARERO

Realizado por
RODRIGO PEREZ DENHEZ

DIRECTOR

Dr. Edward Fernando Toro Perea Ph. D.

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Materiales

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

CALI

2014

CONTENIDO

RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. PROBLEMÁTICA	10
3. OBJETIVOS	12
4. JUSTIFICACION Y PERTINENCIA.....	13
5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	15
5.1 CENIZAS DE CALDERA.....	15
5.2 CEMENTO	23
5.3 MORTERO.....	24
5.4 DISEÑO DE MEZCLAS	25
5.5 PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO	26
5.6 PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO	29
6. DISEÑO METODOLÓGICO	33
7. RESULTADOS	36
7.1 TIPOS DE CENIZA DE CALDERA.....	36
7.2 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS DIFERENTES CENIZAS	37
7.3 ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO EN FRESCO	41
7.3.1 Consistencia	41
7.3.2 Tiempo de fraguado.....	44
7.3.3 Mesa de flujo	47
7.4 ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO	51
7.4.1 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 7 días	51
7.4.2 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 14 días	53
7.4.3 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 28 días	56

7.4.4	Resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza de fondo de caldera	59
8.	CONCLUSIONES.....	60
9.	RECOMENDACIONES	61
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	62
11.	ANEXOS	64

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Requerimientos químicos de la ceniza volante 13
Tabla 2. Análisis químicos de los carbones de Cundinamarca	14
Tabla 3. Análisis químico de los carbones de Acerías Paz del Rio	15
Tabla 4. Análisis químico de los carbones del Valle del Cauca	15
Tabla 5. Componentes principales del cemento Portland	23
Tabla 6. Diseño de mezcla para la fabricación de los morteros	26
Tabla 7. Manejabilidad para diferentes tipos de morteros	28
Tabla 8. (Propiedades en estado fresco)	29
Tabla 9. (Propiedades en estado endurecido)	32
Tabla 10. Los tipos de ceniza de fondo de caldera que se utilizaron	36
Tabla 11. Resistencia a la compresión morteros 7, 14, 28 días.	58

LISTA DE GRÁFICOS.

Grafico 1. Análisis granulométrico Ceniza 100% carbón	38
Grafico 2. Análisis granulométrico Ceniza Carbón-Bagazo	39
Grafico 3. Análisis granulométrico Ceniza combinada	40
Grafico 4. Análisis granulométrico Ceniza gruesa	
Grafico 5. Análisis de Consistencia ceniza gruesa	41
Grafico 6. Análisis de Consistencia ceniza bagazo – carbón	42
Grafico 7. Análisis de Consistencia ceniza 100% carbón	42
Grafico 8. Análisis de Consistencia ceniza combinada	43
Grafico 9. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza gruesa	44
Grafico 10. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza bagazo – carbón	45
Grafico 11. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza 100% carbón	45
Grafico 12. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza combinada	46
Grafico 13. Análisis de Fluidéz ceniza gruesa	47
Grafico 14. Análisis de Fluidéz ceniza bagazo – carbón	48
Grafico 15. Análisis de Fluidéz ceniza 100% carbón	48
Grafico 16. Análisis de Fluidéz ceniza combinada	49

RESUMEN

Esta investigación se encamina con el fin de conocer cuál es el comportamiento y la relación de las propiedades de estado fresco de morteros adicionados con cenizas volantes, dando una alternativa al sector de la construcción y aprovechando un residuo creando un valor agregado, ya que no hay un estudio claro y profundo de las propiedades de los morteros adicionados con las cenizas volantes.

En este estudio se analizó las propiedades de estado fresco de morteros adicionados con cenizas volantes tratadas físicamente a 12 y 15 horas de molienda, relacionándolas con sus propiedades en estado endurecido de dichos morteros y observando el comportamiento de las diferentes mezclas a edades cortas y prolongadas.

Donde se determina que las cenizas al tener tiempos de molienda más prolongados las partículas van a ser mucho más finas, por dichos motivos su tiempo de fraguado y su índice de fluidez van a disminuir, debido a esto su necesidad de agua es mayor por esta circunstancia se hace el uso de aditivos para mejorar su trabajabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria moderna se observa la necesidad de mantener siempre una producción cada vez más económica y amigable con el medio ambiente. Este estudio se enfoca en mejorar las anteriores dificultades orientadas en especial a las industrias azucareras y cementeras ya que el residuo que es producido por los ingenios azucareros son de potencial cementicio, siendo la disminución de los yacimientos de la materia prima de los cementeros.

En esta investigación, se determinó las propiedades de un mortero en estado en fresco y endurecido, adicionado con ceniza de fondo de caldera, las cuales fueron extraídas de dos ingenios de la región, estas cenizas fueron tratadas por un proceso físico de molienda y posteriormente utilizadas en la mezcla de mortero para ser evaluadas usando las normas técnicas. Para el estado en fresco los ensayos realizados fueron la mesa de flujo, consistencia y tiempo de fraguado; para el estado endurecido el ensayo de resistencia a la compresión, a partir de la cuales se determinó el comportamiento de la adición en las mezclas de mortero.

La utilización de cenizas volantes de la caña de azúcar se incorporaran como adición al concreto premezclados o prefabricados y también a morteros en estado fresco y endurecido. En este trabajo se utilizó las cenizas volantes de bagazo y/o carbón (fly Ash) de 2 de los 13 ingenios azucareros presentes en la región, a las cuales se les realizara un estudio técnico para establecer características físicas, los ingenios fueron seleccionados al azar obteniendo dos tipos de cenizas volantes. (Salazar, 2007)

La ceniza volante es considerada la más abundante en la región, por parte de las industrias azucareras. El combustible que utilizan las calderas de los ingenios es el carbón o bagazo de caña el cual desarrolla una combustión y produce las cenizas de fondo de caldera. Las cenizas volantes del bagazo de caña de azúcar o/y carbón (Fly Ash) tienen una buena capacidad de ser adición de cemento por sus características físicas y su alto contenido de sílice (SiO_2), así siendo una posible solución para el campo de la construcción e ingenios azucareros, dándole un uso a este residuo que se genera en gran proporción a nivel regional.

La ceniza volante a partir de tratamientos físicos, mecánicos y químicos se puede manipular la amorficidad de este subproducto de la industria azucarera para ser

adicionado en el concreto convencional como adición, sin afectar las propiedades mecánicas del material, logrando una reducción significativa de la cantidad de cemento (20%) para la elaboración de concreto, que es un material altamente utilizado en sector de la construcción. (alberto, 2012)

Solo Argos que es una de las compañías más grandes en producción de cemento, en el 2011 facturo a la venta 8.8 millones de toneladas de cemento (Canpolat, 2011). Por lo cual la adición de nuevos materiales no convencionales en el cemento cada vez es más estudiada debido a la escases de materias primas que se empiezan a reflejar en el mundo.

2. PROBLEMÁTICA

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de residuos agroindustriales de bagazo de caña y/o carbón de las termoeléctricas pertenecientes a la industria azucarera Colombiana (azucarero, 2013). Las cuales se precisan para un aprovechamiento y una valoración, con el fin de que estas cenizas tengan los componentes apropiados para su uso, partiendo de este orden de ideas el propósito de la investigación es evaluar una relación entre las propiedades en estado en fresco y endurecido de las mezclas de mortero adicionado con cenizas de fondo de caldera debido a su desconocimiento, por esta razón es necesario identificar la relación entre las propiedades de resistencia a la compresión del mortero en estado endurecido con las diferentes cenizas volantes obteniendo un vínculo con las características de conformado y tiempo de fraguado del mortero en estado en fresco, de acuerdo a un diseño de mezclas apropiado con una relación de agua cemento definida.

En el presente estudio se busca que las cenizas volantes sean optimas como adición en morteros y concretos, teniendo un comportamiento positivo y analizando las propiedades físicas y mecánicas del mortero en estado fresco y endurecido. Debido a la carencia de conocimiento de la industria de la construcción de buscar materiales que permitan una construcción sostenible, con las propiedades según las normas técnicas colombianas y a costos razonables, se han adelantado investigaciones frente al uso de partículas a escala micro-métrica; las cuales al ser adicionadas generen ciertos beneficios en el estado fresco del mortero (Saikia, 2012) .

En el campo de la construcción se buscan tecnologías y procesos el cual cumplan con los requerimientos para poder obtener unas buenas propiedades en los morteros en estado fresco, es decir que esta investigación se ha perfilado para medir sus propiedades en el momento de su endurecimiento y preparación de la mezcla, teniendo en cuenta las diferentes cenizas volantes y con una finura óptima.

Se han emprendido diversas investigaciones en las cuales se ha analizado la inclusión de adiciones como cenizas volantes, escorias de alto horno, filler calcáreo, fibras, entre otras, las cuales con el uso de nuevas tecnologías principalmente han cambiado la visión en cuanto al desarrollo del concreto como material (Rojas F. M., 2008) .

El estudio busca unas propiedades físicas óptimas, analizando el comportamiento de la adición de cenizas volantes de carbón o/y bagazo en el estado fresco y endurecido de morteros llevando el estudio a niveles de observación de su estructura atómica.

En este orden de ideas es claro decir que no hay un aprovechamiento del residuo de la combustión de la quema de la caña de azúcar siendo una posible adición en morteros y concretos donde también se desconoce las propiedades de estado en fresco y endurecido de morteros adicionados con cenizas volantes de carbón y/o bagazo. Así dicho estudio observara el comportamiento en el momento de las mezclas teniendo en claro que entre las partículas sean más finas mejores propiedades se obtendrán, basados en investigaciones y en bibliografía sobre adiciones de partículas en morteros frescos y endurecidos, dando una posible solución a resistencias y durabilidades de morteros en fresco a edades cortas y prolongadas.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Estudiar las propiedades en fresco de un mortero adicionado con cenizas de caldera de bagazo y/o carbón de la industria azucarera del Valle del Cauca tratadas físicamente a (12 y 15 horas de molienda), relacionándolas con su estado en fresco (consistencia, fluidez, tiempo de fraguado) y estado endurecido (resistencia a la compresión).

Objetivos Específicos

- Caracterizar físicamente las cenizas de fondo de caldera de bagazo y/o carbón siguiendo el método de la norma ASTM C 311.
- Evaluar las propiedades (consistencia, tiempo de fraguado y fluidez) en fresco del mortero adicionado con la ceniza de bagazo y/o carbón tratada físicamente (12 y 15 horas de molienda).
- Evaluar el comportamiento físico mecánico de morteros adicionados con ceniza tratada físicamente.
- Analizar la relación del estado en fresco (consistencia, fluidez, tiempo de fraguado) y endurecido (resistencia a la compresión) de morteros adicionados con cenizas volantes.

4. JUSTIFICACION Y PERTINENCIA.

En el presente estudio se busca que las cenizas sean una posible adición a los morteros y concretos debido a su potencial puzolánico que tienen, influyendo en la mejora de propiedades mecánicas y en la durabilidad de los diferentes morteros siendo una solución a las grandes cantidades de cenizas que se producen al año por parte de los ingenios azucareros y dando un paso más en la innovación en el sector de la construcción de nuestro país, dándole al residuo provenientes de la caña de azúcar un valor agregado y resolviendo un problema de tipo ambiental.

En años recientes, usar residuos sólidos que provienen del sector agrícola, con capacidad de ser puzolanas ha llamado la atención para su uso en la manufactura de morteros y concretos (Rojas F. M., 2008). Las cenizas de fondo de caldera son el subproducto del bagazo de caña y el carbón utilizados en los sistemas termoeléctricos que abastecen de energía a los ingenios azucareros, generalmente cenizas volantes, que presentan actividad puzolánica cuando se calcinan a temperaturas superiores a los 600 °C. Estas cenizas que tienen actividad puzolánica, son materiales silíceos y/o aluminosos que generan hidróxido de calcio por encima de la temperatura mencionada, para formar compuestos con propiedades cementantes durante la hidratación, similares a las que otorga el cemento (Morales, 2013).

Darle uso a los residuos agroindustriales o generar un valor agregado a partir de desechos, hace parte de un nuevo modelo de producción eficiente de los países en desarrollo, evitando así la contribución a la contaminación de los suelos y el aire y aumentando la vida útil en los mismos procesos. Datos del año 2013, presentan en Colombia una producción total de caña de azúcar estimada en aproximadamente 21.568.243 toneladas, de los cuales cerca del 0.62% del peso de la caña de azúcar corresponde a cenizas volantes (azucarero, 2013).

Implementar el uso de ceniza de caldera tratada físicamente para sustituir una proporción considerable de cemento en las mezclas de mortero, es una oportunidad de negocio en la industria cementera de la región ya que además de generar ganancias a partir de un residuo, de esta manera se contribuye a la conservación del medio ambiente.

Las cenizas o puzolanas son materiales que han tenido una muy buena compatibilidad con las matrices cementicias gracias a su composición química y estructural que estas poseen, por tales motivos han llamado la atención para poder ser utilizadas como incorporaciones en los morteros, buscando una mayor eficiencia y una mayor durabilidad a estos morteros contra agentes agresivos que en la actualidad causan cada vez más daño, creando deterioros y unos rendimientos regulares por parte de los concreteros y los cementeros incurriendo en cuantificaciones de cemento mayores para su elaboración.

Teniendo en cuenta las composiciones de las cenizas volantes y su abundancia en el sector, se busca darle al residuo como tal un valor agregado incorporándolo en matrices cementicias, así dando una alternativa al sector de la construcción que está en constante movimiento, adicionándolas en morteros y vinculando su relación con su estado en fresco y endurecido, por tal motivo las cenizas volantes cumplen con las capacidades para poder ser una adición para los concreteros y morteros.

5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

5.1 CENIZAS DE CALDERA

5.1.1 Definición:

La norma ASTM C-618-12^a define el término ceniza volante como: “El residuo finamente dividido resultante de la combustión del carbón mineral o finamente molido y transportado en el flujo gaseoso”. Esta definición no incluye, entre otras cosas, los residuos resultantes de: (1) la quema de basura municipal o algún otro tipo de basura con carbón; (2) la inyección de cal directamente dentro del calentador para remover azufre; o (3) la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente llamados “incineradores de ceniza”.

5.1.2 Clasificación de las cenizas volantes:

La norma ASTM C-618-12a divide en tres los tipos de ceniza volante como: ceniza clase N, ceniza clase F y ceniza clase C.

- **Ceniza clase N**

Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horstenos opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o sin calcinar; y materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.

- **Ceniza clase F**

Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas. Reaccionan lentamente con la cal y los álcalis

- **Ceniza clase C**

Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón sub bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante además de tener

propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias. Reaccionan formando rápidamente aluminato cálcico hidratado y ettringita.

5.1.3 Composición química de la ceniza volante

Aparentemente existen diferencias considerables en la composición química de la ceniza volante, pero de menor importancia si es comparada con la composición mineralógica y la granulometría (tamaño y forma de la partícula) la cuales determinan la influencia de la ceniza volante en las propiedades del concreto.

La norma ASTM C-618-12a menciona unos parámetros de composición química de la ceniza volante para lograr su clasificación. Los requerimientos se presentan en la tabla 1.

El uso de puzolana de clase F conteniendo más de 12% de pérdida por calcinación puede ser aprobada por el usuario si se cuenta con registros de desempeño o resultados de ensayos aceptables.

	CLASE		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO₂) +óxido de aluminio (Al₂O₃)+óxido de fierro (Fe₂O₃), min%	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO₃), máx. %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx. %	3.0	3.0	3.0
Perdida por calcinación, máx. %	10.0	6.0A	6.0
Oxido de magnesio (MgO), máx. %	5	5	5

Tabla 1. Requerimientos químicos de la ceniza volante.

5.1.4 Procedencia de la ceniza volante

La producción de cenizas volantes proviene principalmente de centrales térmicas, generalmente son producto de la quema del carbón y en ocasiones de bagazo de caña de azúcar. Básicamente

Los tipos de carbón que se utilizan en las centrales termoeléctricas son cuatro: antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito, en los que varía principalmente el poder calorífico y la cantidad de carbón fijo presente. El tipo de carbón utilizado influencia en el tipo de ceniza volante que se obtiene. Estas diferencias se pueden observar en el siguiente análisis químico de carbones de diferentes regiones de Colombia, presentes en las tablas 2, 3 y 4 (anexos). (618, 2001)

Para su uso el carbón es molido finamente hasta efectuar la combustión, hecho que mejora la eficiencia del quemado al ser triturado en partículas finas, con un 75% que pasan la malla #200 (75 μm). Los componentes orgánicos son oxidados y volatilizados durante la combustión y las partículas de cenizas se funden en la zona de combustión del horno, sin embargo una vez que dejan esta zona se enfrían rápidamente, pasando de 1500 °C a 200 °C en pocos segundos, solidificando en partículas esféricas. Alguna de esta materia fundida se aglomera y dado a su tamaño no puede ser arrastrada por el flujo gaseoso depositándose en el fondo de la cámara de combustión formando ceniza de fondo de caldera. Pero la mayoría es arrastrada por el flujo gaseoso y se conoce como ceniza volante.

Para retener las cenizas volantes del flujo de gases que sale de la cámara de combustión y evitar su emisión a la atmósfera se emplean diversos sistemas de retención como: filtros de tejidos especiales, colectores mecánicos (ciclones), depuradores por vía húmeda y precipitadores electrostáticos. Las cenizas volantes

se recogen en las tolvas de los precipitadores electrostáticos, donde son transportadas a lugares de almacenamiento, situadas frecuentemente en balsas de decantación o en seco. La combustión del carbón y/o bagazo de caña en las centrales térmicas se puede realizar por tres diferentes medios que son: a altas temperaturas, por combustión seca y por lecho fluidificado.

5.1.5 Centrales térmicas de alta temperatura

La combustión en centrales térmicas de alta temperatura es realizada entre los 1500-1700 °C. Del 85-90% de las cenizas volantes producidas funden y caen a un baño de agua, donde se apagan con rapidez y son partículas sólidas, en gran parte vítreas. Una mínima cantidad de finos va a los precipitadores electrostáticos en forma de cenizas volantes con bajo contenido de inquemados. (Peña Urueña, 2011)

- ***Centrales térmicas de combustión seca***

La combustión seca en centrales térmicas está entre los 1100-1400 °C, donde Cerca del 90% de las cenizas recolectadas se constituye por partículas finas que permanecen en los precipitadores electrostáticos. Debido a que el enfriamiento es lento, la cantidad de partículas vítreas no es elevada. (Peña Urueña, 2011)

- ***Centrales térmicas de lecho fluidificado***

La temperatura de combustión en las centrales térmicas de lecho fluidificado se encuentra por debajo de los 900 °C, y no presenta fusión. Las cenizas

resultantes son de forma irregular y un porcentaje muy alto de partículas cristalinas.

5.1.6 Usos de las cenizas volantes

Este subproducto, es usado para elaborar vidrio, cerámica y concreto. En el concreto, la ceniza volante puede cumplir tres papeles: 1) adición activa incorporada directamente en la mezcladora; 2) adición inerte, como elemento sustituyente o complementario de las fracciones finas de los arados; 3) en la preparación de cementos molida conjuntamente con el Clinker. (electrica, 2011)

5.1.7 Uso de las cenizas volantes como alternativa del cemento

Una de las alternativas de las cenizas volantes es su uso como corrector de crudo de horno. El crudo de horno es la mezcla de las calizas trituradas extraídas de la cantera y la lechada de arcilla; su composición química es un factor determinante en la obtención del clinker por ello se debe vigilar que el contenido porcentual de óxidos sea el adecuado. Controlar la calidad de las materias primas es una medida eficaz para evitar problemas con la composición del crudo, sin embargo en ocasiones estas presentan un contenido insuficiente de los óxidos de interés, es aquí donde se recurre al uso de correctores. Un corrector es un material, generalmente de naturaleza mineral, que presenta un contenido elevado de óxido de sílice, de alúmina o de hierro, por el cual se puede emplear para balancear la composición química del crudo. En la industria se emplean esquistos (rocas metamórficas con cuarzo), diabasa y calizas de bajo carbonato como correctores de sílice; bauxitas como correctores de alúmina y mineral de hierro como corrector de óxido de hierro. Un requisito que debe cumplir cualquier corrector tiene que ver con el contenido de impurezas, como por ejemplo el óxido de magnesio (MgO),

que compromete la durabilidad del cemento si su contenido en las materias primas es superior al 5%.

Entre un 50% y un 60% del peso de las cenizas volantes es óxido de sílice, lo cual las hace apropiadas para balancear contenido sílice en el crudo de horno; sin embargo es indispensable garantizar el contenido mínimo de impurezas para poder ser empleadas.

5.1.8 Características físicas de las cenizas volantes

Las características físicas de las cenizas se basan en el proceso y eficiencia de las centrales térmicas, además son el mecanismo por el cual las cenizas volantes influyen en las propiedades del concreto fresco y endurecido, depende más de la granulometría, forma y textura de las partículas que de la composición química. La demanda de agua y trabajabilidad están controladas por la distribución del tamaño de partículas, por el efecto de empaquetamiento de las partículas y la suavidad de la superficie. Las propiedades puzolánicas y cementicias, que gobiernan el desarrollo de esfuerzos y permeabilidad de las mezclas, están controladas ambas por las características mineralógicas y el tamaño de partícula de la ceniza volante.

En lo que se refiere a la granulometría de las cenizas volantes, se ha encontrado que todas las partículas son inferiores a 250 μm , entre el 60-90% inferiores a 75 μm , llegando a tamaños inferiores a 1 μm . (J.L, 2013) (Rossello, 2010)

5.1.9 Tratamiento térmico

Los minerales que componen la ceniza volante se forman bajo combustión a altas temperaturas, implementar un tratamiento térmico para activar puzolánicamente una ceniza es un método empleado actualmente, consiste en exponer la ceniza volante a altas temperaturas en rangos comprendidos entre los 500-1000 °C con una tasa de calentamiento de 10°C/min, temperaturas a las cuales se presenta un elevado contenido de fase vítrea y se posee una elevada proporción de SiO₂ y por tanto una elevada reactividad, la cual se mantiene al realizar un enfriamiento a temperatura ambiente garantizando la mayor amorficidad posible y subsecuente reactividad química, Para que la ceniza se active, es decir se forme sílice amorfa (la cual reacciona con cal a temperatura ambiente produciendo una especie de tobermorita o silicato de calcio hidratado, básico para el endurecimiento de matrices de cemento) debe llevarse a una temperatura comprendida entre 600 y 1000 °C. (R, 2010) No obstante factores como la baja eficiencia de las calderas, la temperatura y el tiempo de residencia en el mismo afectan negativamente la puzolanidad de la ceniza. Someter a la ceniza de nuevo al proceso térmico que experimenta dentro de la caldera, es una alternativa para mejorar su reactividad.

La temperatura de incineración además de incidir en la amorficidad de las fases presentes especialmente el SiO₂, influye de manera directa en el tamaño de partícula siendo esta afectación proporcional a la temperatura, entre mayor temperatura sea expuesta la ceniza se obtendrá un menor tamaño de partícula, para el rango de temperatura entre 500-800 °C le corresponde respectivamente un tamaño de partícula entre 0.9-175 µm.

5.1.10 Tratamiento físico

Un factor importante de la calidad de una puzolana es su finura, mientras que esta no sea la adecuada, el mineral se comportara prácticamente como inerte. No existe un acuerdo entre los autores respecto al tamaño promedio de partícula adecuado, se habla de tamaños inferiores a 6 micras (Frias, 2009), otros han obtenido buenos resultados con 13 micras (Cociña, 2010) ; solo se puede decir que el tamaño promedio de partícula optimo dependerá de la finura del cemento, se sugiere que sean parecidos; en Colombia el cemento se elabora con un tamaño de partículas entre 8 y 14 micras (H.F.W, 2013).

El equipo más utilizado para producir partículas de las características del cemento, es el molino de bolas. El molino de bolas usa generalmente bolas de acero inoxidable de diferentes diámetros (aunque también de acero manganeso) para generar mecanismos de impacto y abrasión sobre el material a moler, estos mecanismos, en especial la abrasión, permiten la obtención de granulometrías muy finas (Pk, 2009). Este equipo utiliza para conminuir materiales duros y abrasivos, y produce tamaños promedio de partícula cercanos a 10 micras.

La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino depende en gran parte de la cantidad de energía disponible para mover el molino. Generalmente nunca llega al 50% de volumen, aunque una carga de bolas igual a 50% del volumen del molino da la capacidad máxima, el volumen total de las bolas no debe ser menor que el 20% del volumen interior (las cargas normales varían de 40 a 50%). Donde quiera que se desee una producción mínima de finos debe usar una carga de bolas cuyo diámetro está relacionado al tamaño del mineral que se alimenta, cuanto más pequeñas sean las bolas mayor será la finura del producto final (Rojas F. M., 2008).

Es indispensable conocer la granulometría de la ceniza para estimar el valor de la finura a la cual debe llegar la puzolana. Se recomienda moler por separado el cemento y la puzolana ya que la finura del Clinker disminuye perdiendo potencial.

5.2 CEMENTO

En base a la NTC 3356: 2000, se define el cemento como un material inorgánico fino, con características hidráulicas, es decir que tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua a partir de ciertas reacciones y procesos de hidratación, el cual cuando endurece, conserva su resistencia y estabilidad. (3356, 2010)

El componente base para los diversos cementos, es el clinker, el cual se obtiene a altas temperaturas (aproximadamente 1400 C) donde se combinan cal, sílice, alúmina y óxido férrico, provenientes de materias primas como la caliza, arcilla y mineral de hierro. En la tabla 5 se muestran los principales componentes del cemento.

COMPONENTE	FORMULA QUIMICA	FORMULA ABREVIADA
Silicato tricálcico	3CaO*SiO ₂	C3S
Silicato bicálcico	2CaO*SiO ₂	C2S
Aluminato tricálcico	3CaO*Al ₂ O ₃	C3A
Ferrito aluminato tricálcico	4CaO*Al ₂ O ₃ *Fe ₂ O ₃	C4AF
Yeso	CaSO ₄ *2H ₂ O	CSH ₂

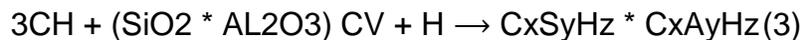
Tabla 5. Componentes principales del cemento Portland

La composición mineralógica del clinker es de gran importancia, ya que influye en la reacción de hidratación de los compuestos que otorgan al cemento sus propiedades físicas y químicas. El silicato cálcico C3S (Alita) y C2S (Belita) representan respectivamente entre el 45-60% y el 15-30% en peso del cemento portland. La Alita y Belita cuando se hidratan producen silicatos cálcicos denominados geles de sílice (C-S-H). A estos geles se les atribuye parte del endurecimiento y resistencia mecánica de la pasta de cemento. Además de los geles C-S-H, la hidratación de los silicatos genera hidróxido de calcio (CH), conocido como Portlandita. El hidróxido de calcio no aporta en gran medida a las

propiedades mecánicas de la pasta, pero aporta alcalinidad, la cual otorga protección a la corrosión a los metales presentes en la mezcla.

El clinker en cementos adicionados, se sustituye parcialmente por materiales con características puzolánicas. Los materiales que se usan son escorias de alto horno, puzolanas naturales, humo de sílice, y cenizas volantes. (O., 2011)

Al realizar adiciones de cenizas volantes (CV), se obtienen mejores propiedades físicas y mecánicas, en la cual el hidróxido de calcio al combinarse con óxidos de aluminio y sílice de la ceniza forma nuevos geles de C-S-H, tal como se indica en las ecuaciones (1), (2) y (3). (certificacion, 2013), (Pihlajavaara, 2013)



5.3 MORTERO

El mortero o cemento de albañilería (como se le conoce en algunos países) es un material versátil capaz de satisfacer una variedad de requisitos, una proporción de mortero influye de manera significativa en el comportamiento de la mampostería [20]. El mortero tiene una amplia gama de aplicaciones: puede ser empleado para nivelar pisos, proteger taludes, recubrir elementos estructurales, pero el mayor consumo está en la construcción de mampostería razón por la cual la tecnología del mortero se ha enfocado principalmente en la rama de la mampostería. Un mortero de mampostería se puede utilizar satisfactoriamente para otros propósitos como las aplicaciones ya mencionadas y los ensayos para control de calidad se aplican a cualquier tipo de mortero. La principal función del mortero es proporcionar una mayor adherencia a las unidades de mampostería, lo cual se logra realizando un buen control de calidad a los materiales y al mortero; para

poder tener una buena adherencia tenemos que contar con buenos materiales, un buen diseño y buenas dosificaciones para que proporcione buena consistencia, buena resistencia (compresión y flexión) y una buena capacidad de retener el agua. (Chandrasekhar S, 2007) El mortero puede definirse como una mezcla de un material aglutinante como cemento Pórtland un material que nos ayude a proporcionar una mayor adherencia como la arena, agua y eventualmente aditivos. Al unirse estos materiales presenta propiedades físicas, químicas y mecánicas. (De Souza C, 2008)

5.4 DISEÑO DE MEZCLAS

Diseñar una mezcla de concreto, consiste en determinar la cantidad de materiales (Cemento, Agua, Agregados y aditivos) que se van a usar para fabricar el volumen unitario del mortero, cuya calidad es definida por las especificaciones de la estructura que se pretende fabricar, debido a las necesidades de la mezcla se hace una utilización de aditivo para darle la trabajabilidad adecuada a la mezcla. De acuerdo a esto el diseño de mezclas definido para el mortero adicionado con ceniza de fondo de caldera se maneja usando la siguiente formulación en la tabla 6. El diseño de la mezcla para mortero se trabajó de esta manera, definido así por estudios bibliográficos realizados con anterioridad, en donde se trabaja las relaciones establecidas en la tabla 6.

MATERIA PRIMA	Relación
Aditivo plastificante	0.1
Agua	0.6
Arena	3.5
Cemento	1
Ceniza	0.2

Tabla 6. Diseño de mezcla para la fabricación de los morteros

5.5 PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (puzolana), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, prácticamente es hormigón sin el agregado grueso. Las propiedades del mortero cuando se encuentra en estado fresco o plástico se establecen de la siguiente manera:

- **Manejabilidad:** Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, es decir, de la facilidad para dejarse manejar. La manejabilidad está relacionada con la consistencia de la mezcla en cuanto a blanda o seca, tal que como se encuentra en estado plástico; depende de la proporción de arena y cemento y de la forma, textura y módulo de finura de la arena. Para medir la manejabilidad del mortero se usa el ensayo de fluidez descrito en la Norma NTC No. 111, aunque en la práctica, hasta ahora, se ha definido por la apreciación del albañil. En la tabla 7 se recomienda una manejabilidad para diferentes tipos de mortero de acuerdo a los tipos de construcción y a los sistemas de colocación.

CONSISTENCIA	FLUIDEZ mm	CONDICION DE COLOCACION	EJEMPLOS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS	EJEMPLOS DE SISTEMAS DE COLOCACION
DURA (seca)	80 - 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, Recubrimiento de túneles, galerías , pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
MEDIA (plástica)	100 - 120	Sin vibración	Pega de mampostería, Baldosines, pañetes y revestimiento	Manual con palas y palustres
FLUIDA (húmeda)	120 - 150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

Tabla 7: Manejabilidad para diferentes tipos de morteros

- **Retención de agua:** se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado, por ejemplo un ladrillo. Para mejorar la retención de agua se puede agregar cal, o aumentar el contenido de finos en la arena, o emplear

aditivos plastificantes o incorporadores de aire. La retención de agua influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, pues un mortero que no retenga el agua no permite la hidratación del cemento.

- **Velocidad de endurecimiento:** Los tiempos de fraguado final e inicial de un mortero están entre 2 y 24 horas; dependen de la composición de la mezcla y de las condiciones ambientales como el clima y humedad. Se define como la calidad del material a utilizar. Por esta razón es importante conocerlas para utilizarlas como criterio de aceptación o rechazo.
- **La consistencia:** del mortero es medida a través del cono de penetración, el cual consiste en un aparato de Vicat modificado, que permite conocer la uniformidad de una bachada a otra y qué tan seca o qué tan húmeda está la mezcla de mortero. La determinación de consistencia por el cono nos permite medir el ajuste de la cantidad de agua para todos los morteros y por lo tanto es importante tenerlo en la serie de ensayos previos a la construcción. Por lo tanto, la consistencia por el cono de penetración puede ser usada para indicar las variaciones de una bachada a otra en los ingredientes de mezcla y en el tiempo de mezclado. Los datos erróneos de consistencia indican un control inadecuado durante la dosificación y el mezclado, pero esto no indica que las adiciones de cemento, arena y agua sean inapropiadas, se puede usar otros métodos para identificar los procedimientos de mezclado insatisfactorio, por ejemplo relación agua-cemento, agua en el mortero o ensayo de contenido de aire (colombia, 2013).

Las propiedades en estado fresco entendiéndose en ellas las que lo hacen trabajable, deformable plásticamente bajo la acción de pequeños esfuerzos. Determinan las condiciones de uso del mortero tabla 8.

Estado	Propiedad	Consecuencias	Ensayos
	Fluidez	Permite deslizar la cuchara y posicionar los mampuestos	Cono de Abrams y mesa de flujo Mesa
Fresco	Cohesión	De la cohesión depende que el mortero no se desintegre al colocarse en la hilada, afecta la adherencia a los mampuestos y su capacidad de soportarlos sin deformarse antes de endurecer.	Cono de Abrams y mesa de flujo
	Retención	La retención permite la trabajabilidad. El agua no se debe perder por evaporación o absorción de los mampuestos. Desaparecería el estado fresco	Cumplimiento de norma

Tabla 8 (propiedades en estado fresco)

5.5.1 ENSAYOS EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS

Para las pruebas que caracterizan las propiedades del mortero en estado fresco, las cuales están definidas por las normas NTC111 y NTC 4088,

Mesa de flujo:

La norma técnica Colombia definida como la NTC111, la cual consiste en el método para definir la fluidez de morteros de cemento hidráulico, estableciendo así la manejabilidad del mortero mediante el uso de aparatos calibrados bajo estándares ISO, los cuales esta soportados en la norma. (colombianas N. t., 2005)

Aguja de Vicat:

La norma técnica colombiana definida como NTC 4088 la cual consiste en el método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico, por medio del aparato de Vicat modificado, estableciendo los tiempos de fraguado y consistencia de la mezcla de mortero utilizando aparatos calibrados bajo los estándares ISO, los cuales son establecidos por la norma. (colombianas N. t., 2006)

5.6 PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO

Las propiedades del mortero cuando se encuentra en estado endurecido se establecen de la siguiente manera:

- **Retracción:** se debe principalmente a la retracción de la pasta de cemento y se ve aumentada cuando el mortero tiene altos contenidos de cemento. Para mejorar esta retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa, y tener en cuenta además que en clima caliente y de muchos vientos, el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero, que se traducen en grietas visibles. La retracción es proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar.
- **Adherencia:** es la capacidad de absorber, tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura, es decir a la capacidad de responder monolíticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie sobre la que se va a

colocar el mortero sea tan rugosa como sea posible y tenga una absorción adecuada, comparable con la del mortero.

- **Resistencia:** Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas y sucesos, tal es el caso de la mampostería estructural, debe poseer una alta resistencia a la compresión. Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos.

El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. Por último el contenido de agua del mortero tiene influencia sobre su resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados.

- **Durabilidad:** Al igual que en el concreto, la durabilidad se define como la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como: Baja temperatura, penetración de agua, desgaste por abrasión y agentes corrosivos. En general, se puede decir que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad.
- **Apariencia:** La apariencia del mortero después de fraguado juega un importante papel en las mamposterías de ladrillo a la vista; para lograr una buena apariencia es necesario aplicar morteros de buena plasticidad.

Las propiedades en estado endurecido cuando tiene la edad necesaria para adquirir resistencia mecánica tabla 9.

Estado	Propiedad	Consecuencia	Ensayos
	Resistencia a la compresión	Está asociada a la durabilidad e impermeabilidad. Interviene en la resistencia mecánica del muro.	Resistencia a la compresión
Endurecido	Modulo de deformación	Influye en la capacidad de deformación de la pared frente a pequeñas modificaciones dimensionales	Norma módulo de deformación
	Retracción secado	Está ligada a la susceptibilidad de figuración de las juntas o revoques debido al fenómeno de la retracción	norma s/retracción de secado mortero endurecido

TABLA 9 (propiedades en estado endurecido)

5.6.1 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO DE MORTEROS

Para las pruebas que caracterizan las propiedades del mortero en estado endurecido, las cuales están definidas por las normas NTC 220.

Resistencia a la compresión

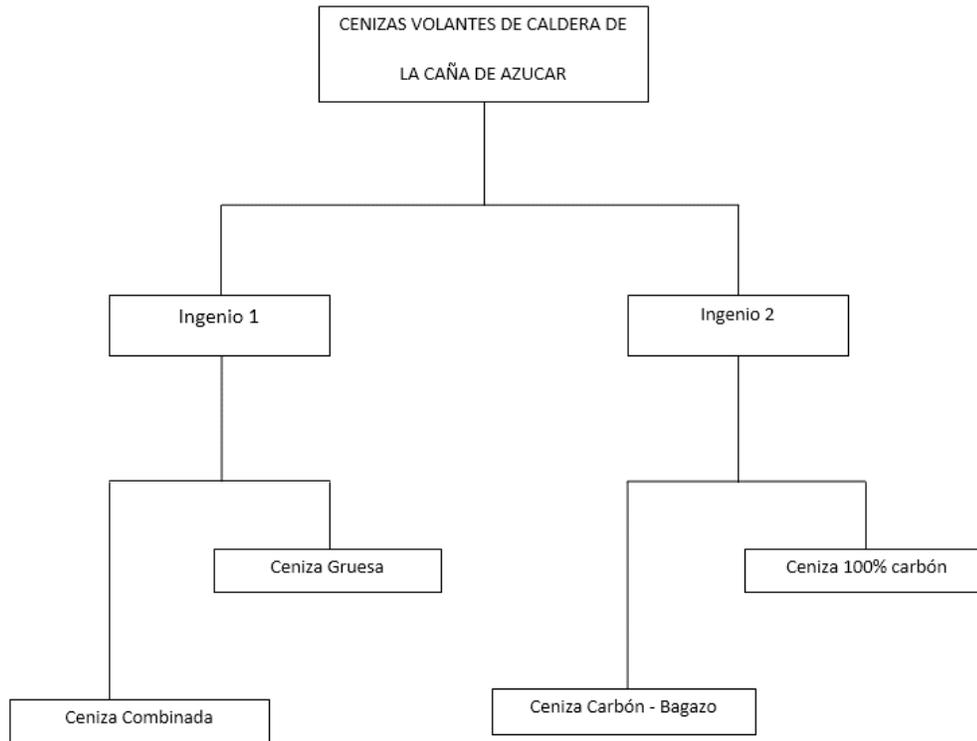
La norma técnica colombiana definida como la NTC 220, la cual consiste en la determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado (colombiana, 2006). La resistencia a la compresión es la medida para observar la capacidad que tiene el mortero de soportar esfuerzos. Como la resistencia a la compresión está influenciada por la hidratación del cemento y esta a su vez determina las propiedades físicas del mortero endurecido, es posible que mediante los resultados de resistencia inferir otras propiedades. Además es la propiedad más indicativa del comportamiento del mortero en los cerramientos portantes construidos con mampuestos. La resistencia debe ser lo más elevada posible aunque es conveniente que sea inferior a los elementos de albañilería que va a unir. La NTC considera como resistencia optima de un

mortero para muros una resistencia a la compresión a los 28 días de 40 kg/cm² (ingeniería, 2012).

6. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología se realizó en cinco etapas las cuales se establecen de la siguiente manera:

- **Muestreo:** En esta primera etapa se determinaron cuántas y cuales empresas producen cenizas de fondo de caldera en el Valle del Cauca, para ello se empleó una base de datos empresarial suministrada por la cámara de comercio de Cali, así como también solicitará información relacionada a organismos como Cenicaña y CVC para caracterizar las muestras y poder determinar cuáles cenizas volantes se utilizarían para ser adicionadas en matrices cementicias.
- **Caracterización:** Para la segunda etapa se identificaron los tipos de cenizas a emplear en la investigación de acuerdo a la base de datos obtenida anteriormente, posteriormente se les realizó un tratamiento físico a las cenizas seleccionadas como lo muestra el esquema 1, el cual consistió en modificar el tamaño de las partículas empleando un molino de bolas, con el fin de obtener un módulo de finura óptimo para poderlo incorporar a una matriz cementicia. Estas cenizas volantes seleccionadas al realizarles el tratamiento físico se establecieron tiempos de moliendas de 12 y 15 horas con el fin de obtener la finura adecuada para poderlas incorporar en matrices cementicias y que fueran una adición a una mezcla de morteros o concretos con el fin de que sus propiedades a edades cortas y prolongadas fueran de un óptimo rendimiento a nivel físico y mecánico.



Esquema 1. Cenizas seleccionadas para el tratamiento físico de molienda

- **Tratamientos:** Continuando con la metodología planteada se procedió a la tercera etapa en la cual se realizaron las mezclas correspondientes con cada ceniza de bagazo/ carbón de acuerdo al diseño de mezclas que se planteó en la tabla 6. Donde la ceniza después de su tratamiento físico en el molino de bolas se incorpora como una adición al mortero, teniendo en cuenta la relación agua cemento en el momento de realizar las diferentes mezclas con las diferentes cenizas a determinados tiempos.
- **Evaluación de las propiedades en estado fresco:** En la cuarta etapa se evaluaron las propiedades en estado fresco de los morteros realizados con cada ceniza, de los cuales se evaluaron las características del mortero utilizando las normas NTC No. 111 para determinar manejabilidad y la NTC 110 para el ensayo de aguja de VICAT (consistencia y tiempo de fraguado), así obteniendo datos sobre el comportamiento de cada una de las mezclas realizadas con las cenizas volantes después de sus tratamientos físicos.

- ***Evaluación de las propiedades en estado endurecido:*** Para la etapa final se evaluaron las propiedades en estado endurecido de los morteros adicionados con cenizas volantes, después de pasar por un proceso de curado, dichos ensayos se realizaron a los 7, 14 y 28 días bajo la norma NTC 220. Estos ensayos se le realizaron a especímenes en forma de cubo después de tener los procesos adecuados de su fraguado y curado así sometiéndolos a las condiciones más extremas con el fin de ver su comportamiento y su durabilidad de dichas mezclas adicionadas para después por medio de ensayos de resistencias determinar si cumplían con las normas técnicas colombianas y poder ser utilizados a grandes escalas en la construcción.

7. RESULTADOS

7.1 TIPOS DE CENIZA DE CALDERA.

A partir de los diferentes ingenios azucareros, se seleccionaron diferentes muestras de ceniza de fondo de caldera, las cuales fueron definidas de acuerdo a sus características físicas y el tipo de material que provienen su combustión.

Tipos de ceniza
Ceniza gruesa
Ceniza carbón-bagazo
Ceniza 100% carbón
Ceniza combinada

Tabla 10. Los tipos de ceniza de fondo de caldera que se utilizaron

La ceniza gruesa se definió así por su tamaño de partícula, comparado al de los demás tipos. En el caso de la ceniza carbón-bagazo se definió así ya que provenía de la combustión de una combinación de bagazo de caña y carbón mineral. Para la ceniza 100% carbón se establece por el uso de carbón mineral para la combustión. Finalmente la ceniza combinada proviene de la mezcla de los diferentes tipos de ceniza en cantidades variables nombradas anteriormente.

7.2 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS DIFERENTES CENIZAS

El análisis granulométrico de las diferentes cenizas de fondo de caldera, se efectuó utilizando la norma NTC77 utilizando los tamices para determinar el tamaño de los agregados.

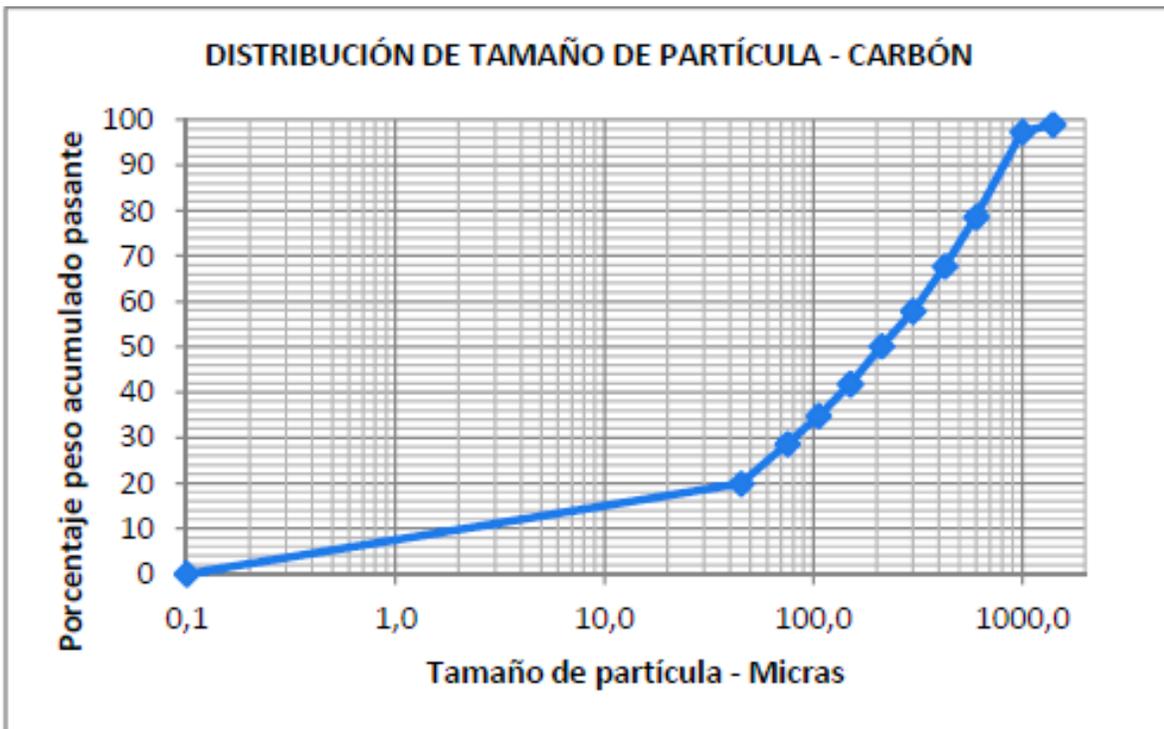


Grafico 1. Análisis granulométrico Ceniza 100% carbón

En el Grafico 1, la cual presenta la distribución del tamaño de partícula de la ceniza 100% carbón, se observa una distribución no homogénea ya que el mayor porcentaje acumulado de partículas de ceniza se distribuye en diferentes tamaños de partículas representados en el gráfico, en este caso el tamaño de los granos no es uniforme.

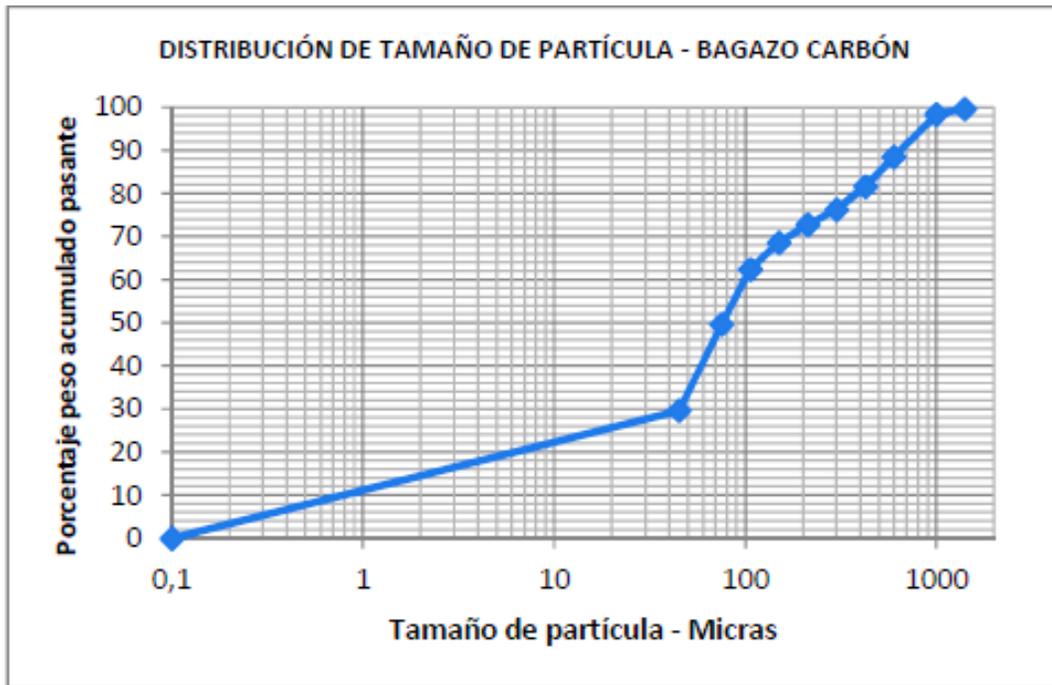


Grafico 2. Análisis granulométrico Ceniza Carbón-Bagazo

Al igual que para la ceniza 100% carbón, en la Grafico 2, la cual presenta la distribución del tamaño de partícula de la ceniza Carbón-Bagazo, se observa una distribución no homogénea ya que el mayor porcentaje acumulado de partículas de ceniza se distribuye en diferentes tamaños de partículas representados en el gráfico, en este caso el tamaño de los granos no es uniforme.

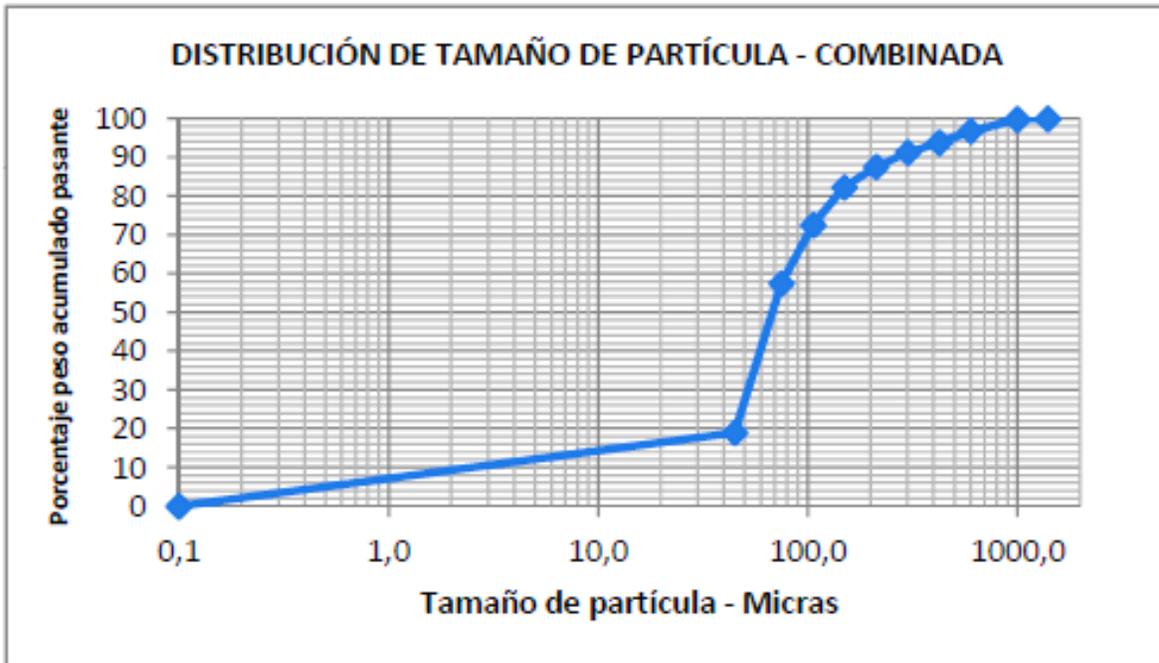


Grafico 3. Análisis granulométrico Ceniza combinada

En la Grafico 3, la cual presenta la distribución del tamaño de partícula de la ceniza combinada, se aprecia una distribución mucho más homogénea que la de las cenizas anteriores, ya que la distribución de tamaños de partículas se concentran en tamices específicos de mayor tamaño, en este caso el tamaño de grano es relativamente uniforme de acuerdo al grafico de la distribución de tamaño de partícula de la ceniza combinada

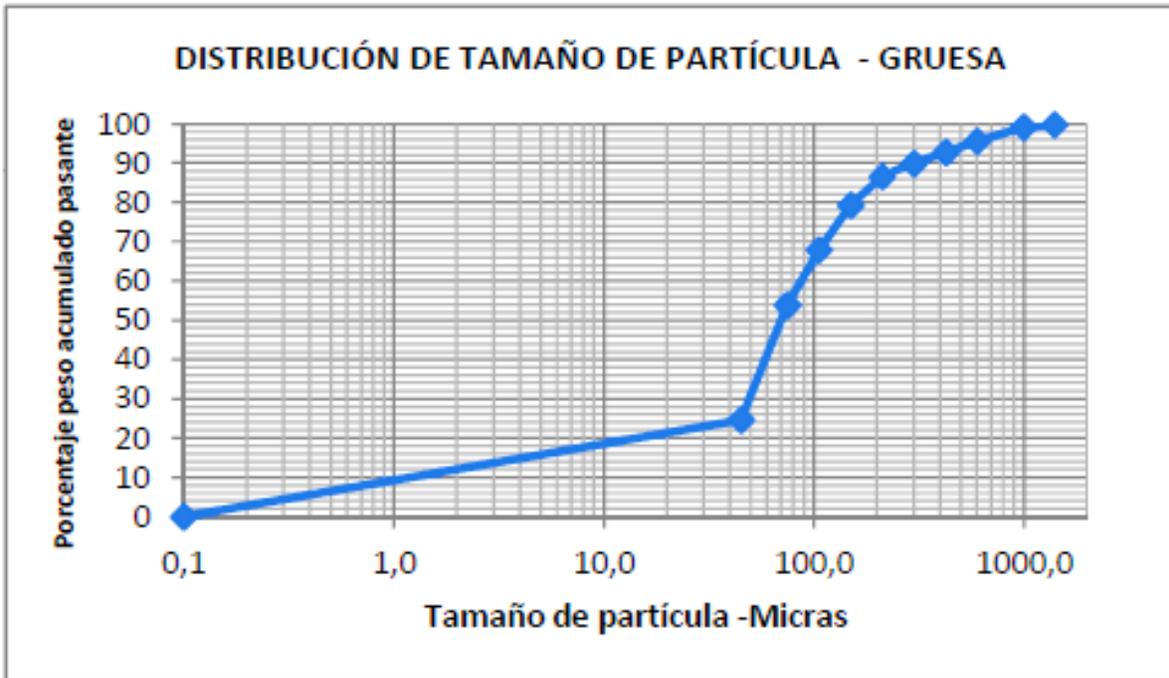


Grafico 4. Análisis granulométrico Ceniza gruesa

En la Grafico 4, la cual presenta la distribución del tamaño de partícula de la ceniza gruesa, se aprecia una distribución mucho más homogénea que la de las cenizas anteriores, ya que la distribución de tamaños de partículas se concentran en tamices específicos de mayor tamaño, en este caso el tamaño de grano es relativamente uniforme de acuerdo al grafico de la distribución de tamaño de partícula de la ceniza combinada

De acuerdo a los resultados presentados en las tablas anteriores se evidencia dos características de la distribución granulométrica de las partículas en las cenizas, en el caso de la ceniza de 100% carbón y carbón-bagazo se identifica que ambas mantienen una distribución heterogénea de los tamaños de las partículas presentes en estas, sin embargo se presenta el caso contrario en la distribución de tamaños de partículas para la cenizas combinada y gruesas, las cuales mantienen un tamaño de grano uniforme y más grande que las primeras dos.

7.3 ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO EN FRESCO

Los ensayos efectuados al mortero adicionado con ceniza de caldera, durante su estado en fresco, para determinar sus características y los efectos que generaban las diferentes cenizas y sus tiempos de molienda a la consistencia, tiempo de fraguado y fluidez de los morteros adicionados.

7.3.1 Consistencia

A partir de la norma NTC 4088, la cual utiliza la aguja de vicat modificada para medir la consistencia de la mezcla de mortero se obtienen los resultados representados, en los determinados gráficos que hay a continuación

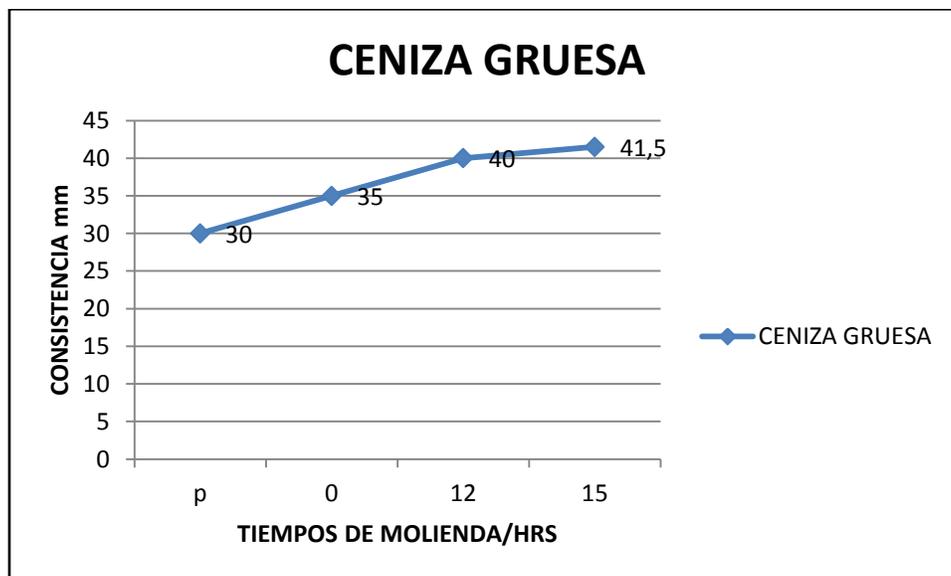


Grafico 5. Análisis de Consistencia ceniza gruesa

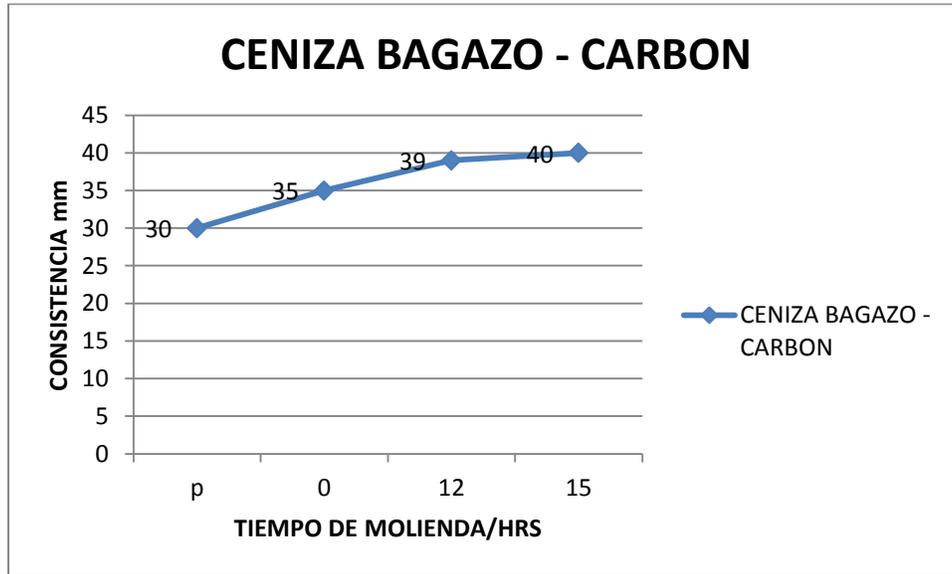


Grafico 6. Análisis de Consistencia ceniza bagazo - carbón

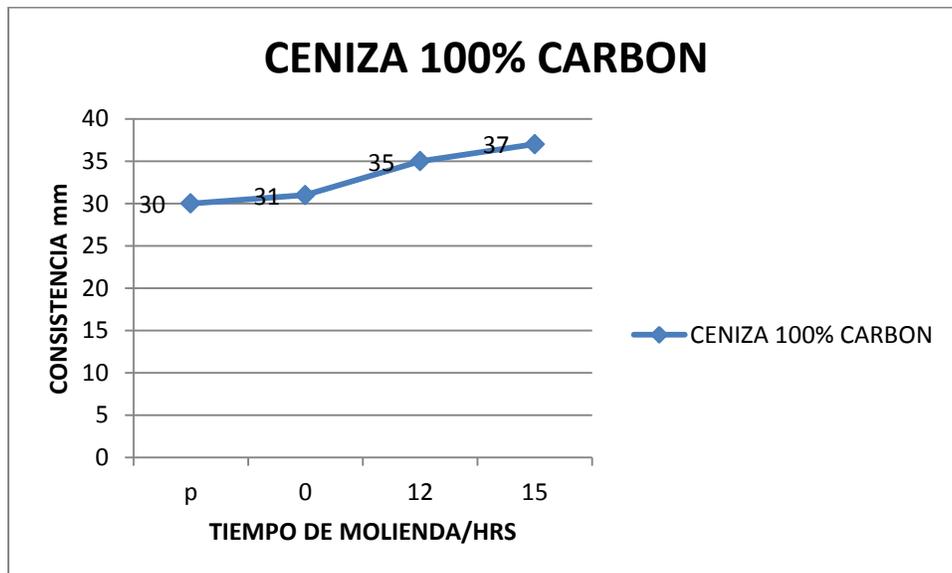


Grafico 7. Análisis de Consistencia ceniza 100% carbón

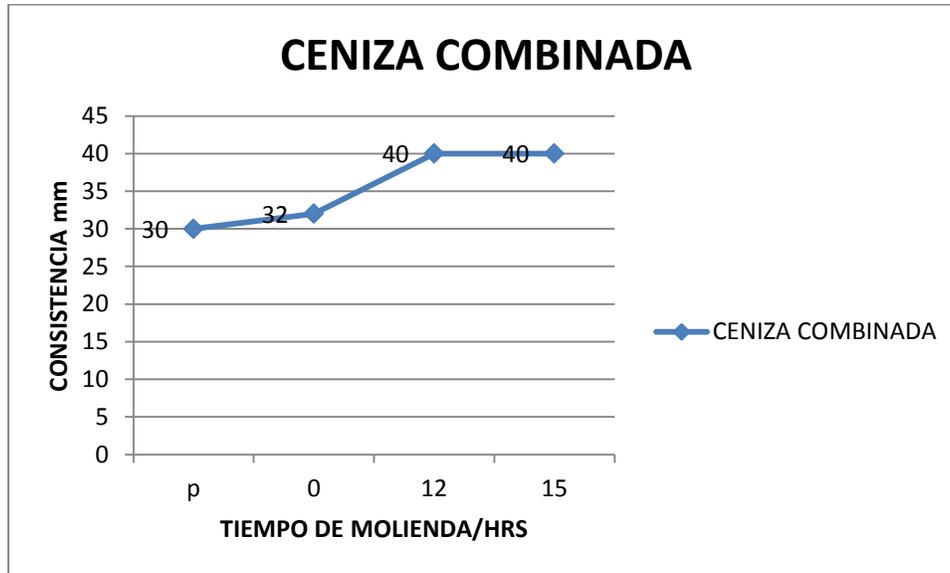


Grafico 8. Análisis de Consistencia ceniza combinada

En los gráficos de las diferentes cenizas podemos observar que a medida que su tiempo de molienda aumenta la consistencia de las diferentes mezclas también van a aumentar puesto que entre la ceniza sea mucho más fina la mezcla va a tener un estado menos manejable.

7.3.2 Tiempo de fraguado

A partir de la norma NTC 4088, la cual utiliza la aguja de vicat modificada para medir el tiempo de fraguado de la mezcla de mortero se obtienen los resultados representados en los diferentes gráficos.

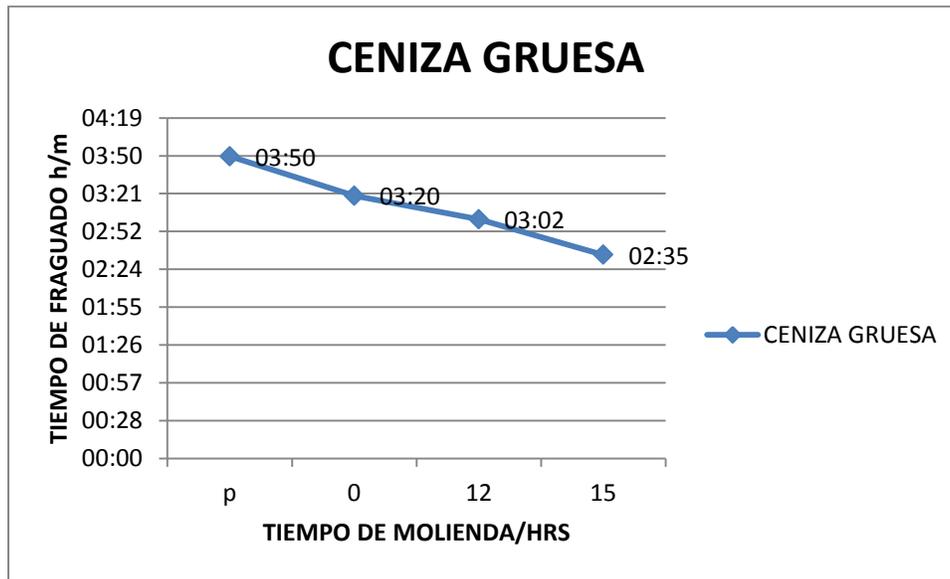


Grafico 9. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza gruesa

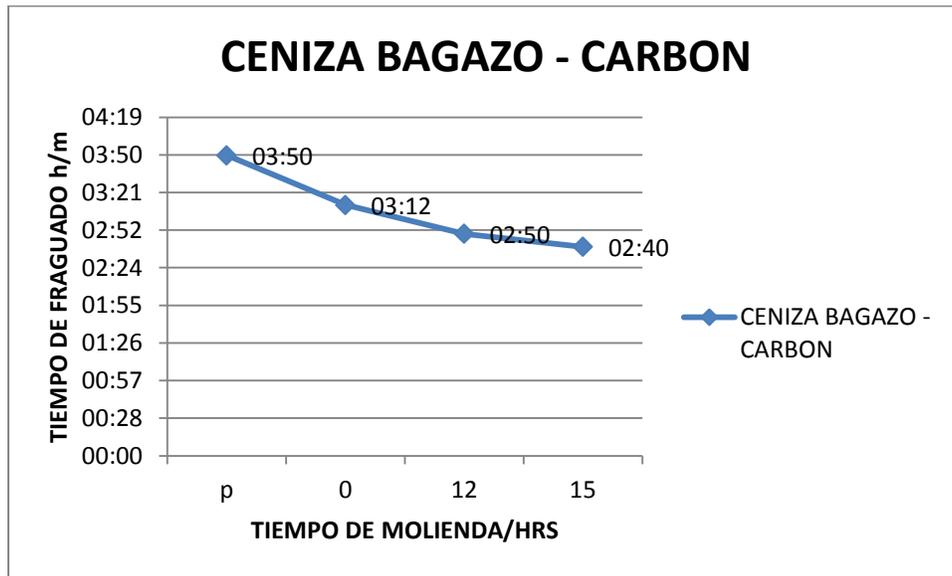


Grafico 10. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza bagazo – carbón

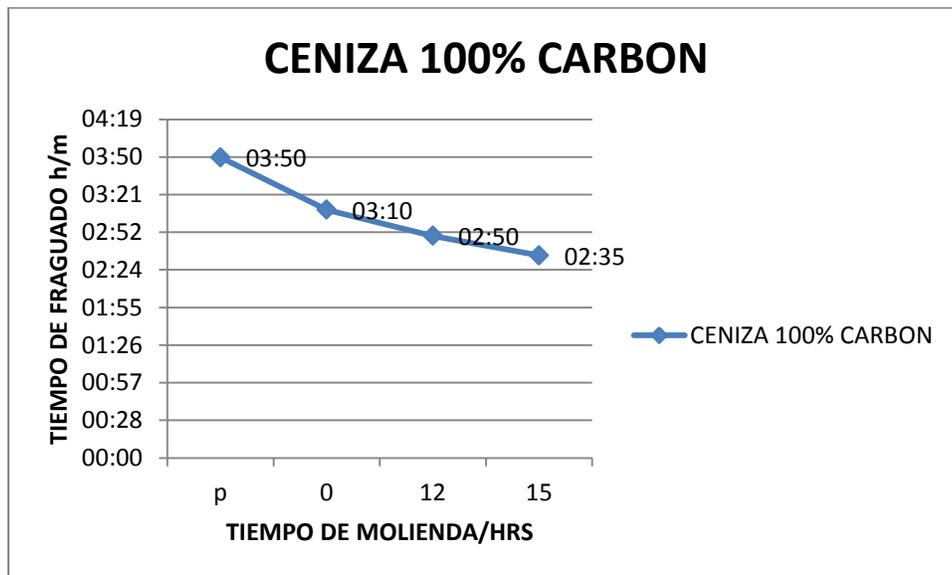


Grafico 11. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza 100% carbón

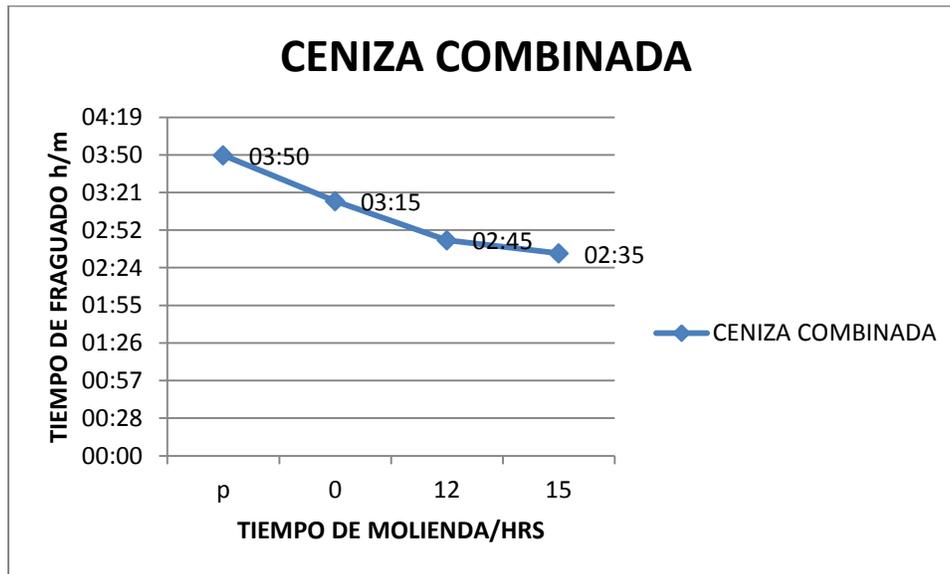


Grafico 12. Análisis de Tiempo de fraguado ceniza combinada

En los diferentes gráficos, se observan los tiempos durante el cual los morteros adicionados con cenizas de fondo de caldera poseen la suficiente trabajabilidad para ser utilizados sin adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio del fraguado.

Este ensayo está definido por el tiempo que en minutos a partir del cual un mortero alcanza un límite de resistencia a ser penetrado con un indentador, referenciado en la norma, De acuerdo a esto los, datos representados en las diferentes graficas indican que a mayor tiempo de tratamiento físico de molienda de las diferentes cenizas el tiempo de fraguado tiende a disminuir sin importar el tipo de ceniza que se use para la fabricación de la mezcla de mortero. Adicional a ello es apreciable definir que el tiempo de fraguado en las mezclas de mortero adicionadas con las diferentes cenizas de fondo de caldera es muy similar, ya que la diferencia en tiempos es mínima o no se aprecia mayor incremento del tiempo.

7.3.3 Mesa de flujo

A partir de la norma NTC 111, la cual utiliza la mesa de flujo para medir el la manejabilidad de la mezcla de mortero se obtienen los resultados representados en los diferentes gráficos.

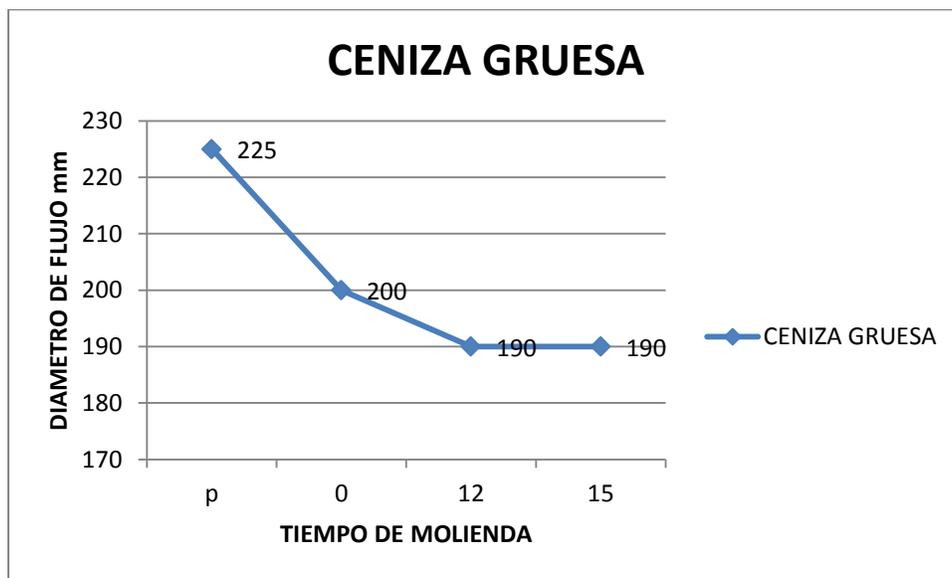


Gráfico 13. Análisis de Fluidez ceniza gruesa

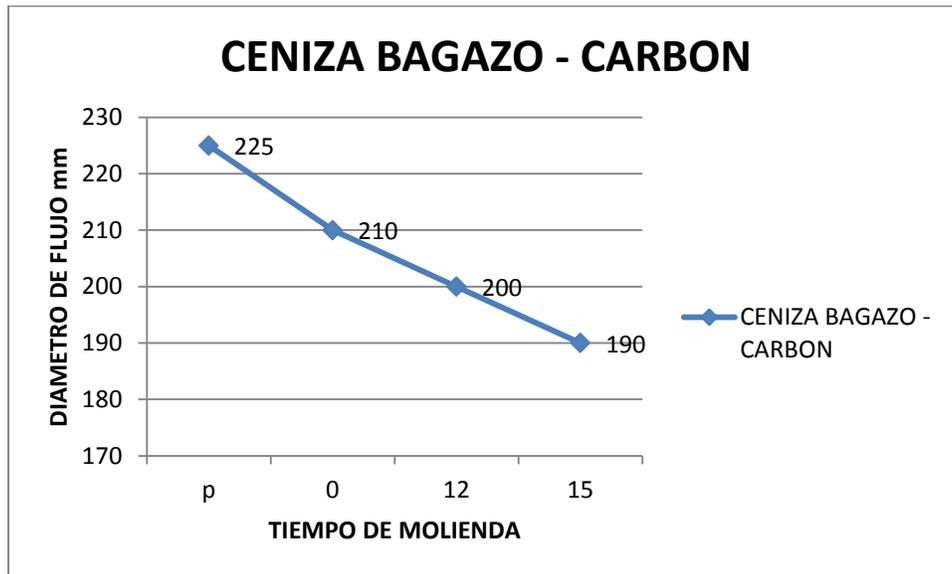


Grafico 14. Análisis de Fluidez ceniza bagazo – carbón

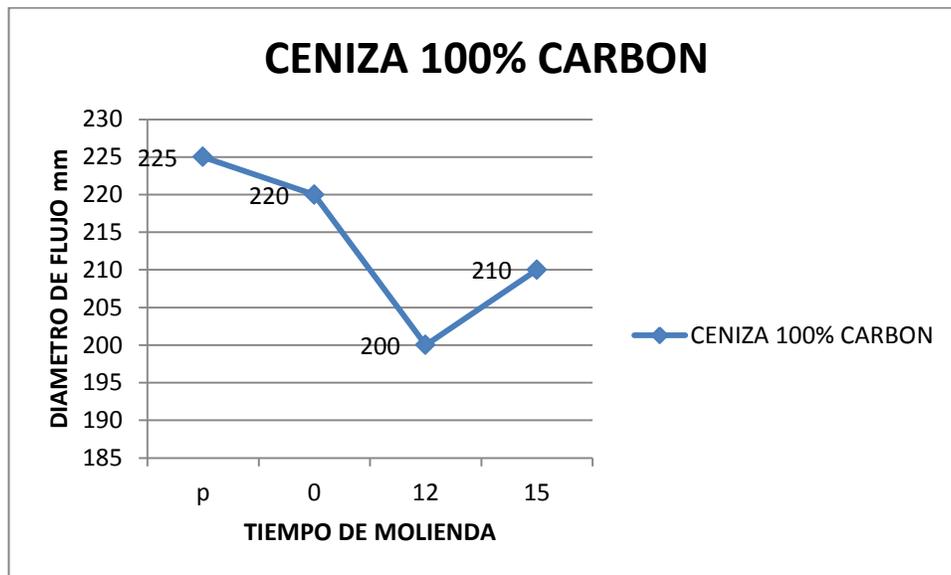


Grafico 15. Análisis de Fluidez ceniza 100% carbón

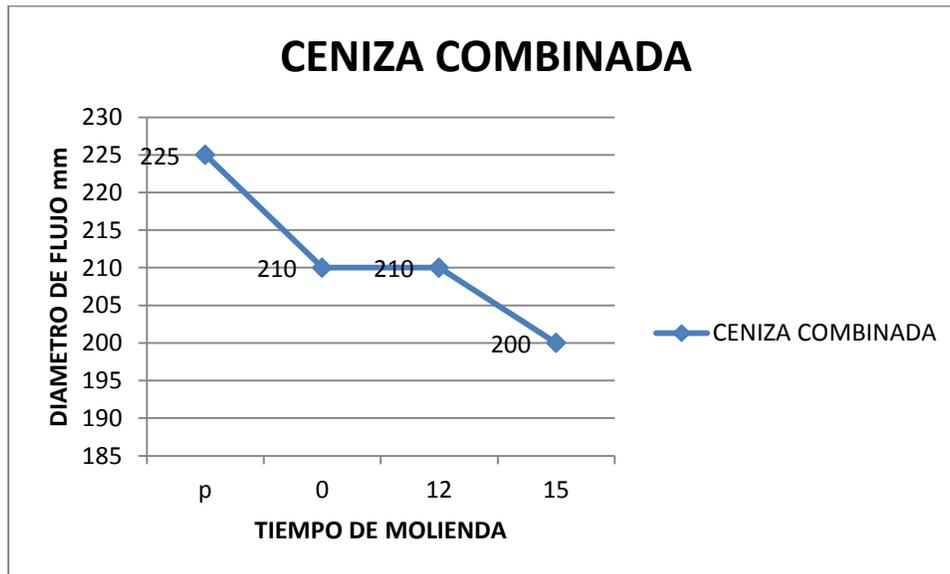


Grafico 16. Análisis de Fluidez ceniza combinada

La manejabilidad de la mezcla de mortero está definida por la trabajabilidad o consistencia del mismo. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como de las condiciones ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc.

En los distintos gráficos se observan los resultados obtenidos en la mesa de flujo para las diferentes mezclas de mortero adicionadas con ceniza de fondo de caldera, a grandes rasgos se identifica que la manejabilidad de las mezclas disminuye conforme aumenta el tiempo en tratamiento físico de molienda de las cenizas sin importar el tipo, en este caso tenemos una relación directamente proporcional al tamaño de las partículas de las cenizas adicionadas a la mezcla respecto a la manejabilidad de la misma.

Para los resultados obtenidos durante el ensayo de la mesa de flujo definido por la norma, se aprecia que las mezcla de mortero presentan un comportamiento muy fluido, indicado por el diámetro de flujo mayor o igual a 225 mm en la mayoría de los casos, en donde era apreciable la tendencia a la segregación de la pasta y el agregado.

La manejabilidad de la mezcla, está relacionada con la proporción de agua/cemento, definida en el diseño de mezclas, adicional a esto es importante identificar que el uso de plastificante incrementa la fluidez de la mezcla, produciendo así una alta exudación, resultado es una mezcla no homogénea con una posible merma en las propiedades finales del mortero endurecido.

7.4 ENSAYOS DEL MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO

El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento de unión resistente del sistema constructivo del que forma parte. Para los resultados obtenidos de las diferentes mezclas, determinados a edades tempranas según la norma NTC 220, en la cual se evaluó la resistencia a la compresión de los cubos de morteros adicionados con las diferentes cenizas de fondo de caldera los resultados se pueden identificar a continuación en los siguientes graficos.

7.4.1 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 7 días

De acuerdo a las pruebas de realizadas a los cubos después de 7 días de curado se obtuvieron los siguientes resultados identificados en los siguientes graficos.

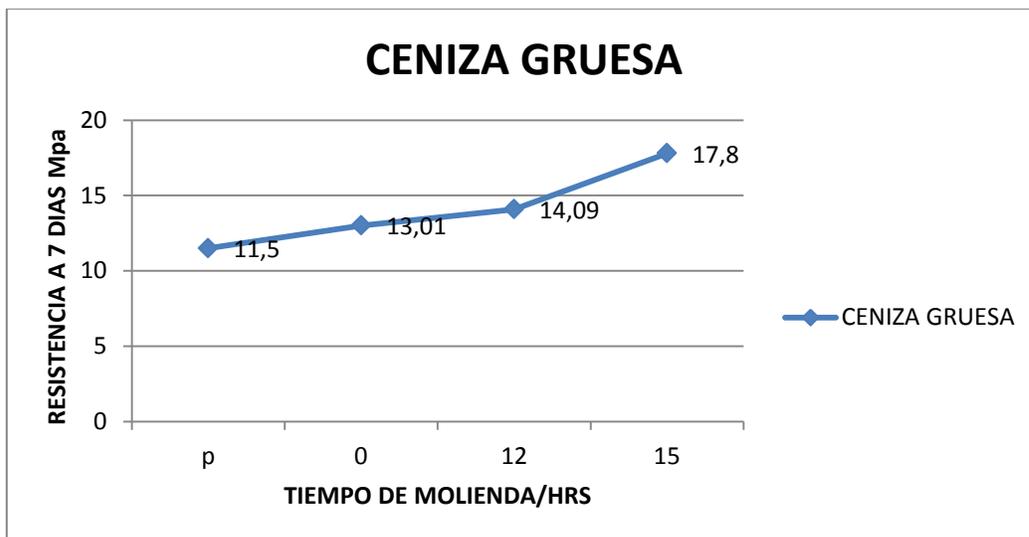


Gráfico 17. Análisis de Resistencia ceniza gruesa

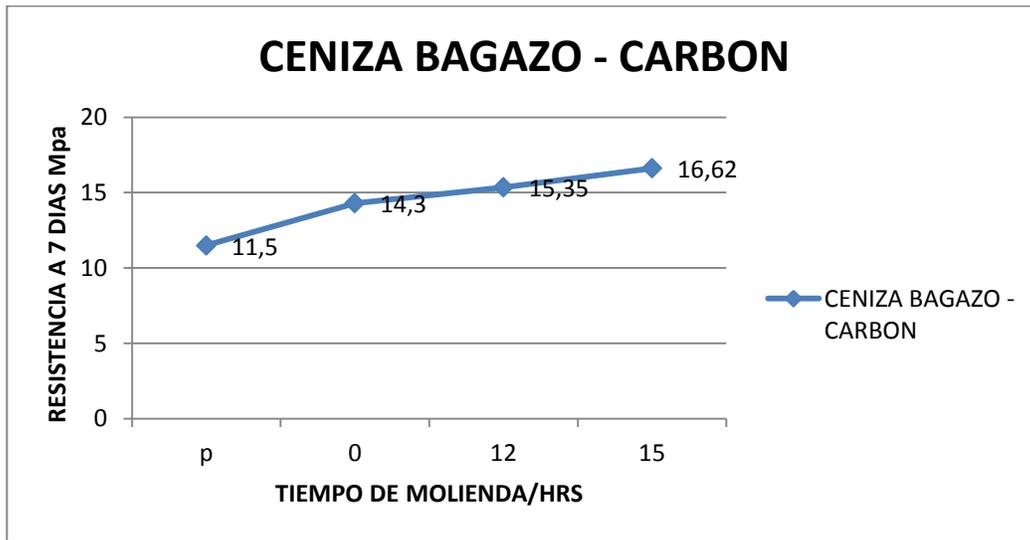


Grafico 18. Análisis de Resistencia ceniza bagazo – carbón

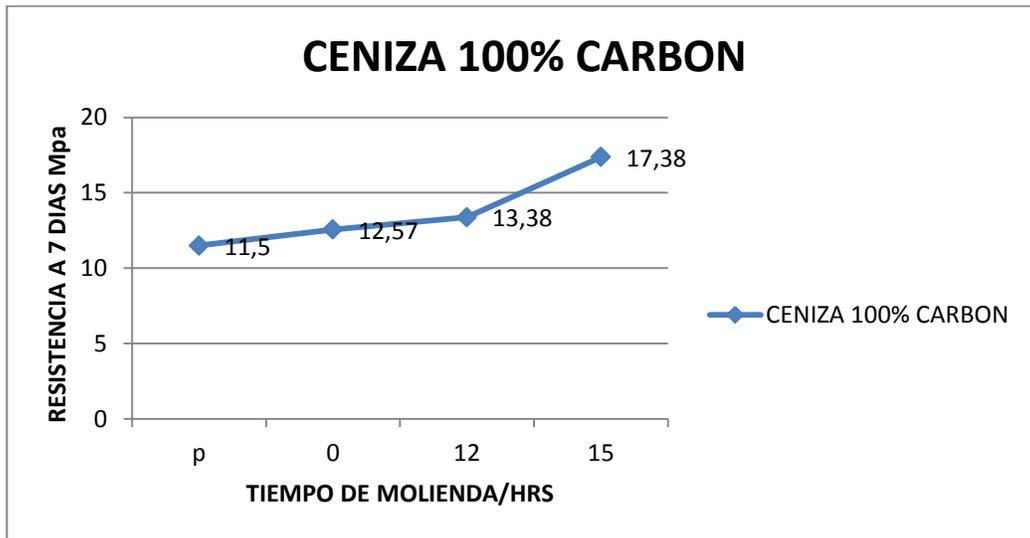


Grafico 19. Análisis de Resistencia ceniza 100% carbón

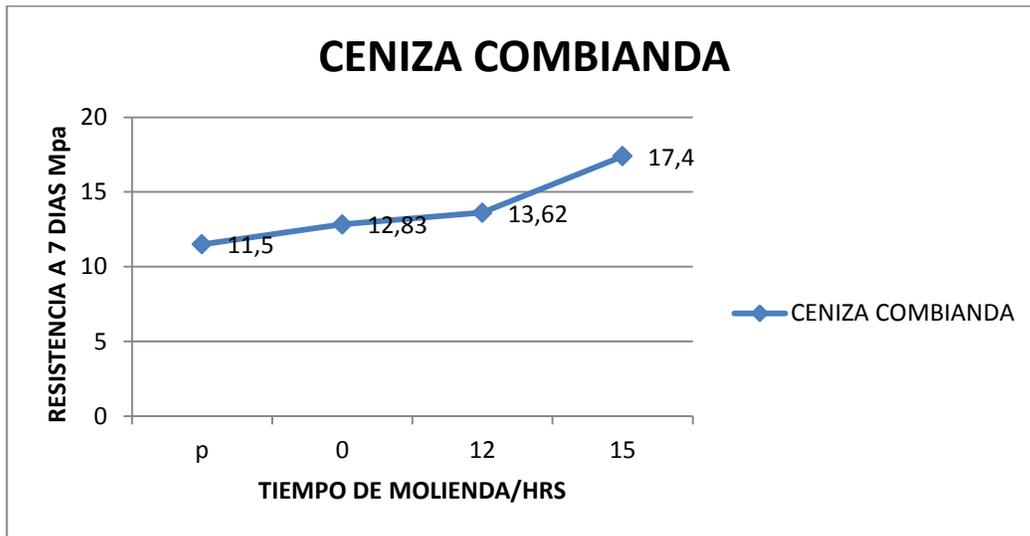


Gráfico 20. Análisis de Resistencia ceniza combinada

Para los resultados obtenidos en las siguientes graficas se evidencia el incremento de la resistencia en las diferentes mezclas de ceniza, proporcional al tiempo de molienda de estas, en las cuales la resistencia a la compresión del mortero a edad temprana es mayor en las cenizas tratada físicamente, para reducir su tamaño de partícula. Es de resaltar que la resistencia a los 7 días se obtuvo resultados de mayor valor en las mezclas de ceniza 100% carbón y combinadas rondando los 17.4 Mpa.

7.4.2 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 14 días

De acuerdo a las pruebas realizadas a los cubos después de 14 días de curado se obtuvieron los siguientes resultados identificados en los siguientes graficos.

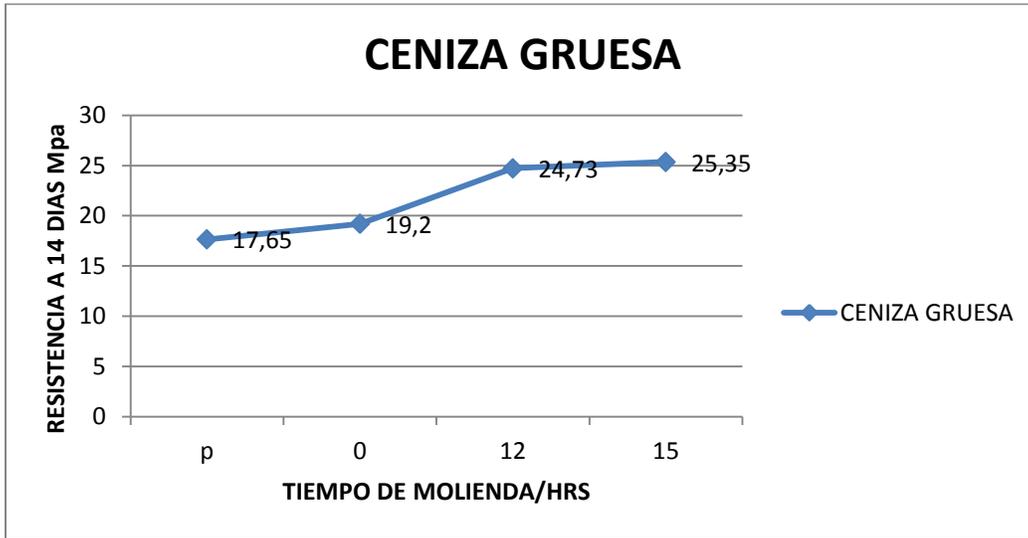


Grafico 21. Análisis de Resistencia ceniza gruesa

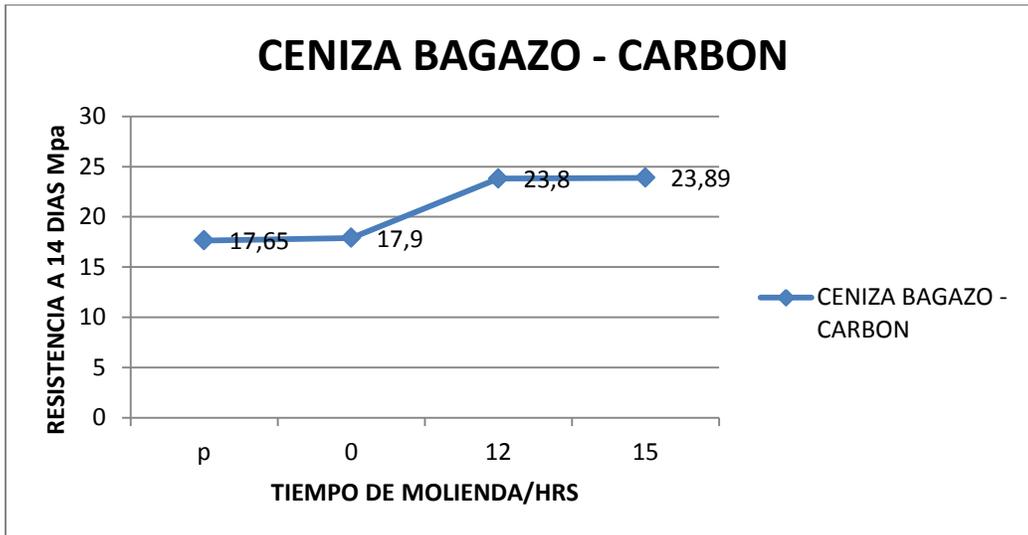


Grafico 22. Análisis de Resistencia ceniza bagazo – carbón

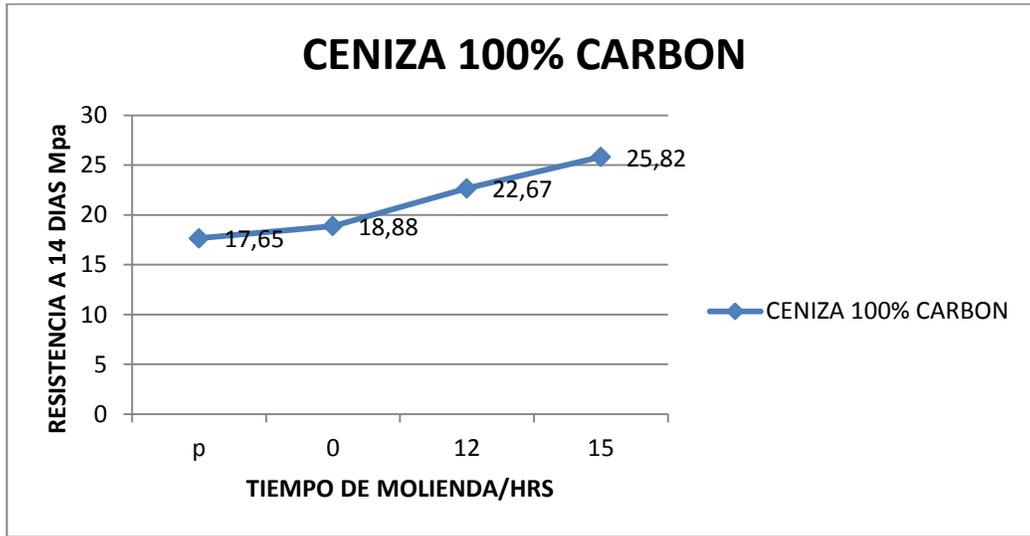


Grafico 23. Análisis de Resistencia ceniza 100% carbón

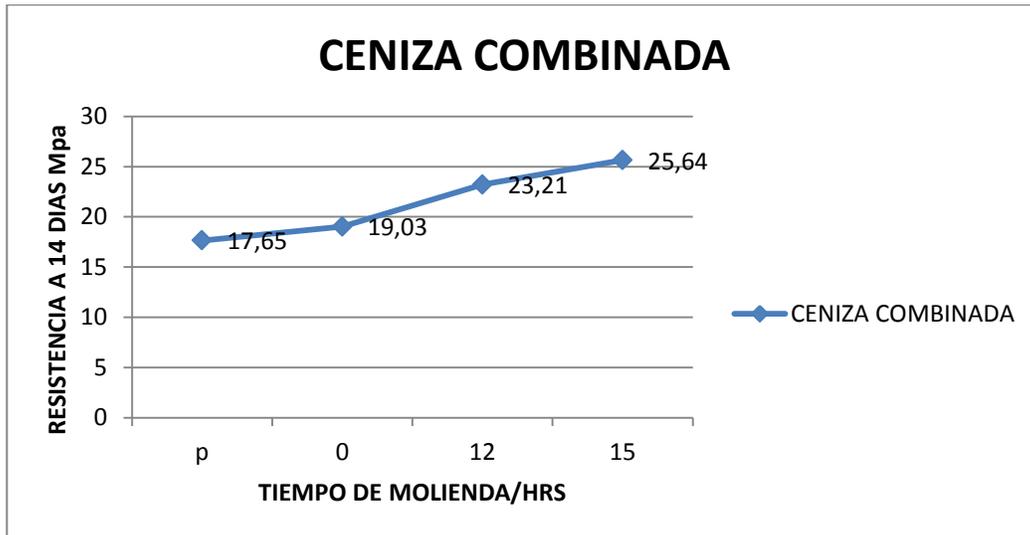


Grafico 24. Análisis de Resistencia ceniza combinada

Para las siguientes graficas se observa el mismo resultado de incremento en la resistencia a la compresión en las mezclas adicionadas con ceniza a las cuales se les realizo el tratamiento físico de molienda, adicional a ello presentan el mismo comportamiento que en la tabla anterior, pues la mezclas de mayor resistencia a 14 días siguen siendo las adicionadas con ceniza 100% carbón y combinada.

7.4.3 Resultados de resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza a los 28 días

De acuerdo a las pruebas de realizadas a los cubos después de 28 días de curado se obtuvieron los siguientes resultados identificados en las grraficas siguientes.

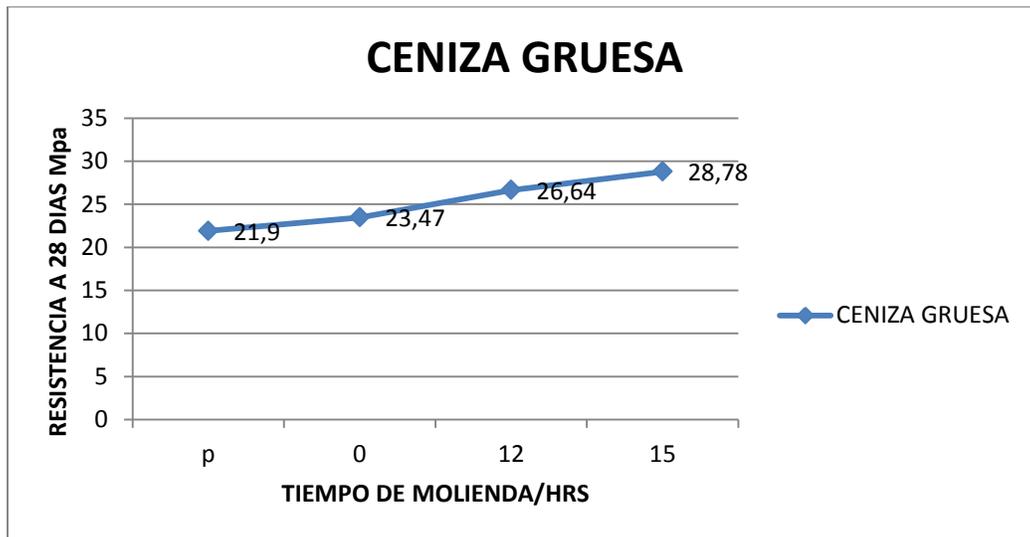


Grafico 25. Análisis de Resistencia ceniza gruesa

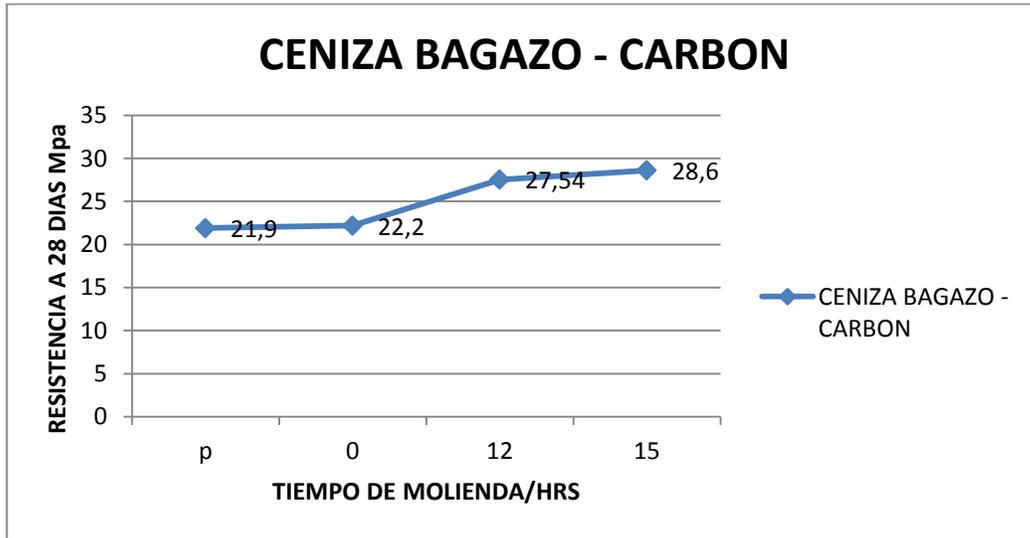


Grafico 26. Análisis de Resistencia ceniza bagazo – carbón

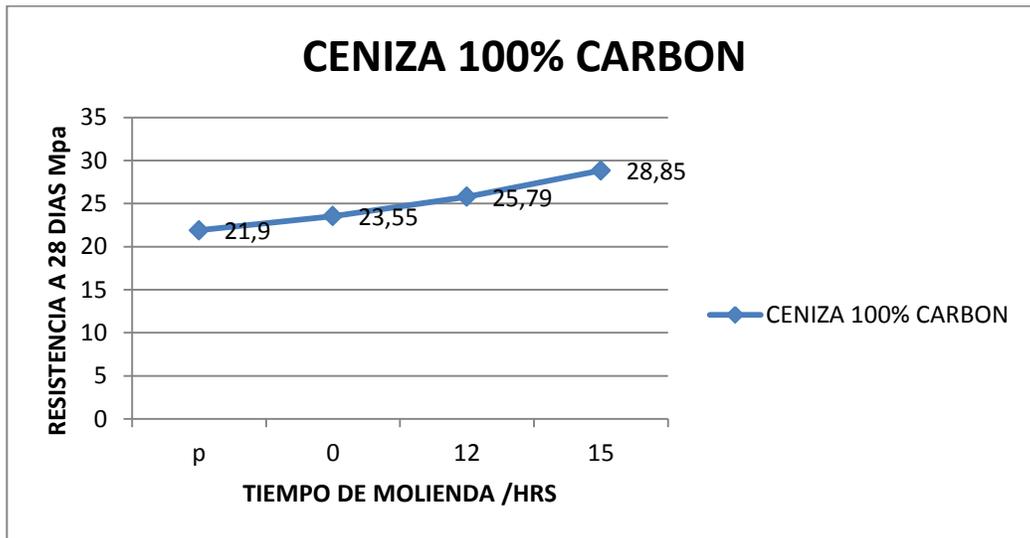


Grafico 27. Análisis de Resistencia ceniza 100% carbón

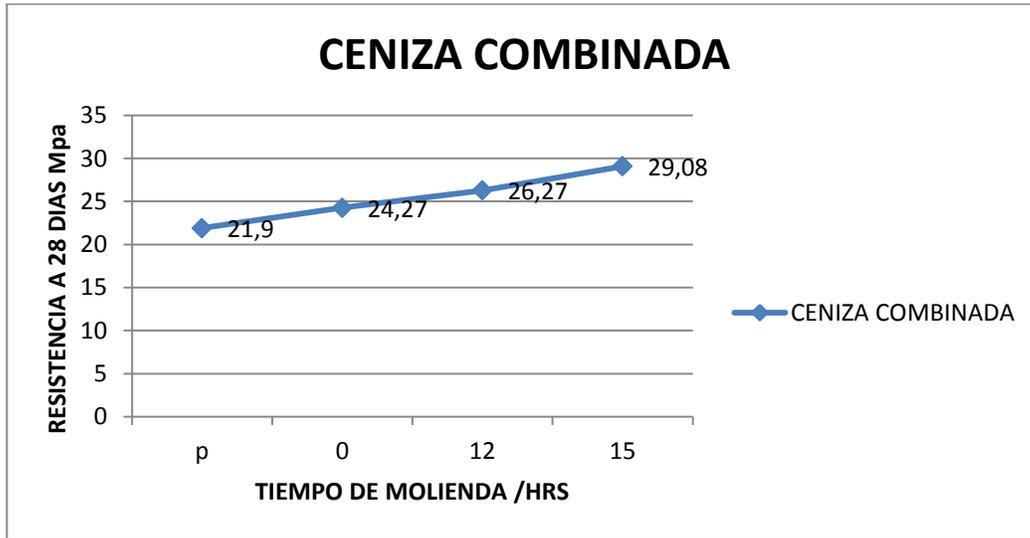


Grafico 28. Análisis de Resistencia ceniza combinada

Finalmente en los últimos gráficos se obtienen los resultados de la resistencia a 28 días de las diferentes mezclas, en la cual se mantiene la tendencia de mayor resistencia proporcional al tiempo de tratamiento físico, sin embargo las mezclas tiende a presentar resultados semejantes de resistencia sin importar el tipo de ceniza,

TIPO DE CENIZA	7 Días Mpa	14 Días Mpa	28 Días Mpa
Ceniza gruesa sin tratamiento	13,01	19,20	23.47
Ceniza gruesa 12 horas	14,09	24,73	26.64
Ceniza gruesa 15 horas	17,80	25,35	28.78
Ceniza bagazo - carbón sin tratamiento	14,30	17,90	22.22
Ceniza bagazo - carbón 12 horas	15,35	23,80	27.54
Ceniza bagazo - carbón 15 horas	16,62	23,89	28.60
Ceniza 100 % carbón sin tratamiento	12,57	18,88	23.55
Ceniza 100 % carbón 12 horas	13,38	22,67	25.79
Ceniza 100 % carbón 15 horas	17,38	25,82	28.85
Ceniza combinada sin tratamiento	12,83	19,03	24.27
Ceniza combinada 12 horas	13,62	23,21	26.27
Ceniza combinada 15 horas	17,40	25,64	29.08

Tabla 11. Resistencia a la compresión morteros 7, 14, 28 días.

En la tabla 17 se representa los valores de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de mortero, en las cuales son comparados y donde se obtiene un incremento en la resistencia a edades cortas, cuando se efectúa la molienda, para reducir el tamaño de la partícula presente en las cenizas, este resultado se evidencia para todas las mezclas. Es importante resaltar que la cenizas que arrojaron mejor resultado de resistencia a la compresión es la mezcla adicionada con ceniza combinada a la cual se le efectuó un tratamiento de 15 horas en el molino de bolas.

7.4.4 Resistencia a la compresión de los morteros adicionados con ceniza de fondo de caldera

En la resistencia a la compresión de morteros de las diferentes mezclas la tendencia que se obtiene y se observa es en un incremento de la resistencia a edades cortas, cuando se efectúa la molienda, para reducir el tamaño de la partícula presente en las cenizas, este resultado se evidencia para todas las mezclas, teniendo en cuenta que todas las cenizas tuvieron tratamiento físico por medio de un molino de bolas por tiempos de 12 y 15 horas cada ceniza.

Es importante resaltar que la cenizas que arrojaron mejor resultado de resistencia a la compresión es la mezcla adicionada con combinada a la cual se le efectuó un tratamiento de 15 horas en el molino de bolas.

Otro factor a tener en cuenta en la resistencia a la compresión de los cubos es el cemento con el que se elaboraron las mezclas de morteros adicionados con cenizas volantes, puesto que el cemento es uno de los más influyentes para determinar si el incremento del porcentaje se produce a edades cortas o prolongadas así jugando un papel importante en su comportamiento.

8. CONCLUSIONES

- Se identificó el comportamiento de la mezcla de mortero adicionado con ceniza volantes provenientes del sector azucarero, estableciendo una clara relación del estado en fresco (consistencia, tiempo de fraguado y mesa de flujo) y el endurecido (resistencia a la compresión) del material, donde se determinó que las partículas de las cenizas entre más finas mejor es la reacción de aglomeración y adherencia a la matriz cementicia, comprobándose por medio de las resistencias a compresión, al ser estas más altas a medida que la finura aumenta.
- Se determinó que las cenizas al ser más finas su tiempo de fraguado en estado en fresco es menor, y su necesidad de agua es mayor, por esta circunstancia se tuvo que usar aditivos que mejoran la trabajabilidad de la mezcla.
- Se estableció un comportamiento mecánico proporcional de los morteros adicionados, la mezcla con un 20% de cenizas volantes tratadas dio una resistencia a la compresión de 29.08 Mpa a 28 días.
- Se identificó que la manejabilidad de las diferentes mezclas se reducía conforme aumentaba el tiempo de molienda de las cenizas, siendo obligatorio el uso de un plastificante sikaplast 326 para mejorar la manejabilidad, la cual en la mesa de flujo estuvo entre 190 y 210 mm.
- Se determinó que las mezclas de mortero adicionadas con las cenizas denominadas 100% carbón y combinada generaron mayor resistencia a edades tempranas que los restantes tipos de ceniza.

9. RECOMENDACIONES

Cabe decir que para ser utilizadas las cenizas volantes del sector azucarero como adición se debe tener en cuenta que al pasar por el proceso físico se obtiene una partícula mucho más fina siendo una ventaja para una matriz cementicia puesto que sus resistencias mecánicas serían mayores.

Teniendo en cuenta su finura es importante decir que al ser partículas mucho más finas su demanda de agua debe de ser mayor debido al proceso físico que presentaron a 12 y 15 horas de molienda, evitando en el diseño de mezclas de morteros que vaya a sufrir falsos fraguados o una reducción en el tiempo del fraguado inicial, creando inconvenientes en las propiedades y comportamientos de las mezclas a tempranas y largas edades.

Es importante decir que las cenizas son un residuo que debe tener un aprovechamiento adecuado para sacar sus mejores ventajas siendo una adición para los morteros y concretos así obteniendo resultados bastantes óptimos y unas resistencias físico mecánicas altas. .

10. BIBLIOGRAFÍA

- Mortero premezclado para mampostería 3356, N. T. (2010). Estructura e ingenierías del concreto - Mortero premezclado para mampostería .*
- 618, A. C. (2001). *Especificación estándar para las cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso como aditivo mineral en concreto*. Libro anual de normas ASTM, VOL 04,02 - 2001.
- alberto, b. g. (2012). *repository.javeriana.edu.co*.
- azucarero, A. s. (2013). *Balance azucarero de Colombia*. Bogotá.
- Canpolat, F. (julio de 2011). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. manisa, turquia.
- certificación, A. e. (2013). *Recomendaciones para el uso de los cementos* . madrid .
- Chandrasekhar S, P. P. (2007). *Efecto de la temperatura de la calcinación y la velocidad de calentamiento en las propiedades ópticas y reactividad de ceniza de cascara de arroz* .
- Cociña, M. E. (2010). *Efectos de la calcinación en condiciones microestructurales y la influencia puzolánica activada* . santos BR.
- colombiana, U. n. (2013). *Morteros con puzolanas* .
- colombiana, N. t. (2006). *Método para determinar la resistencia de morteros de cemento hidráulico* .
- colombianas, N. t. (2005). *Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico* .
- colombianas, N. t. (2006). *Método para determinar el tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico mediante el aparato de vicat* .
- Dane. (2012). *Producto interno bruto - cuatro trimestre* . bogota.
- De Souza C, G. K. (2008). *La porosidad y la permeabilidad al agua de la cascara de arroz - compuesto de cemento reforzado con pulpa de bambú*.

- electrica, A. d. (2011). *Las cenizas volantes y sus aplicaciones* . Madrid.
- Frias, V. -C. (2009). *Actividad puzolanica en materiales* . Valencia : ACI MASTER.
- H.F.W, T. (2013). *Quimica del cemento* . Thomas Telford Publishing Ltd.
- ingenieria, f. d. (2012). *montevideo Uruguay*.
- J.L, A. R. (2013). *Origenes, tipos y caracterizacion de las cenizas volantes* . Madrid.
- M, A. (2013). *Tecnologia del concreto moderno* . londres.
- Morales, V.-C. . (2013). *Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: a kinetic–diffusive model*.
- O., V. (2011). *Durabilidad, permeabilidad del concreto con el factor del deterioro y la corrosion con agentes agresivos* . Praga: Rilem International Symposium.
- Peña Urueña, M. L. (2011). *Caracterizacion de cenizas de algunos carbones colombianos*. bogota: Universidad nacional de colombia - Facultad de ciencias . Departamento de quimica .
- Pihlajavaara. (2013). *Corrleacion de las propiedades de permeabilidad y puzolanas de concretos y morteros* . D.F Mexico .
- Pk, M. (2009). *El rol de los materiales cementicios en la industria del concreto - procesos de la puzolana natural en concreto*. Bangkok.
- R, L. H. (2010). *Sociedad de la difusion de tecnicas para cenizas en morteros y concretos adicionados* . paris: AU PIED DU MURK .
- Rojas, F. M. (2008). *La medicion de la actividad puzolanica* .
- Rojas, F. M. (2008). *Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry* . *Materiales de construccion* .
- Rossello, J. G. (2010). *Las cenizas volantes en los hormigones para presas* . madrid .
- Saikia, N. (2012). *Assessment of Pb-slag, MSWI bottom ash and boiler and fly ash for using as a fine aggregate in cement mortar*.
- Salazar, A. J. (2007). *investigacion y desarrollo para la utilizacion de residuos industriales en la produccion de elementos de mamposteria* . cali: corporacion construir para el desarrollo del poryecto CVC.

11. ANEXOS

TABLA ANEXO 1

REFERENCIAL	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	TIPO
porcentaje en masa, %											
C1	59.48	24.46	1.93	1.43	0.35	0.49	0.72	1.70	1.73	0.30	Bituminoso
C2	56.48	27.58	6.86	0.50	0.35	0.38	0.81	1.32	1.36	0.00	Bituminoso
C3	59.48	30.03	2.72	0.41	0.65	0.46	1.67	1.28	1.30	0.01	Bituminoso
C4	60.33	25.12	1.72	1.55	1.09	0.47	1.76	1.49	1.51	0.05	Lignítico
C5	53.06	26.26	7.58	0.34	0.70	0.31	1.73	1.14	1.73	0.30	Bituminoso
C6	60.76	28.71	7.43	0.69	0.70	0.40	1.34	1.05	1.05	0.10	Lignítico
C7	62.04	21.46	3.72	0.67	0.86	0.38	2.05	1.12	1.12	0.01	Bituminoso
C8	65.47	21.34	1.86	0.50	0.76	0.46	2.05	1.05	1.05	0.19	Bituminoso

TABLA ANEXO 2

REFERENCIAL	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	ppcal	TIPO
porcentaje en masa, %												
P1	58.19	26.07	3.37	3.26	0.45	0.61	0.89	1.34	2.43	0.61	0.84	Lignitico
P2	59.90	23.99	3.26	2.76	0.56	0.80	1.08	1.17	1.39	1.82	1.38	Lignitico
P3	58.62	22.67	10.42	0.66	0.48	0.40	1.52	1.00	0.49	0.32	1.43	Bituminoso
P4	52.63	34.38	5.79	0.49	0.78	0.26	0.22	2.93	0.10	0.55	0.70	Bituminoso
P5	67.61	24.37	3.16	0.45	0.58	0.39	1.42	0.99	0.33	0.07	0.55	Bituminoso
P6	75.31	17.19	2.23	0.31	0.71	0.44	1.30	1.04	0.26	0.01	0.29	Bituminoso

Tabla 3. Análisis químico de los carbones de Acerías Paz del Rio

TABLA ANEXO 3

REFE RENC IA	SiO 2	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O 5	SO ₃	ppcal	TIPO
porcentaje en masa, %												
V1	27.38	19.83	19.16	7.70	3.78	1.66	0.12	1.26	0.15	14.60	3.40	Bituminoso
V2	65.47	21.72	2.85	1.80	0.58	0.38	0.89	1.28	1.71	0.68	0.80	Bituminoso
V3	44.50	30.60	9.99	2.80	1.72	0.82	0.73	3.15	0.16	3.18	1.10	Bituminoso
V4	46.21	30.22	7.03	2.90	1.89	0.93	0.82	3.80	0.11	3.40	1.06	Bituminoso
V5	46.64	33.62	4.95	2.06	1.36	0.61	0.54	4.18	0.11	2.62	1.43	Bituminoso
V6	45.78	33.24	6.95	2.14	1.39	0.67	0.59	3.80	0.10	2.33	1.06	Bituminoso
V7	62.04	23.99	6.56	0.78	0.61	0.51	0.45	1.14	0.58	0.40	1.15	Bituminoso

Tabla 4. Análisis químico de los carbones del Valle del Cauca