

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CEMENTO HIDRÁULICO
ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES DE LA CENTRAL
DE GENERACIÓN TÉRMICA TERMOPAIPA**

JUAN CARLOS BARRERA QUIJANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2010

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CEMENTO HIDRÁULICO
ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES DE LA CENTRAL
DE GENERACIÓN TÉRMICA DE TERMOPAIPA**

JUAN CARLOS BARRERA QUIJANO

**Trabajo de grado para optar por el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
MARIO ÁLVAREZ
Ingeniero Químico Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A mis padres por su esfuerzo, apoyo y comprensión a lo largo de toda mi vida, sin ustedes esto no hubiese sido posible

A mi hermano por su amistad y cariño.

A ti Yesica, por ser mi aliciente, mis ganas de seguir luchando, mi fuerza, mi vida.

A Diana por su apoyo, amor incondicional y su fe en mí

A toda mi familia por su buen ejemplo y compañía durante toda mi vida

A Álvaro y Carlos, su amistad y colaboración me ayudaron a ser quien soy.

Y a todas aquellas personas que de alguna manera me guiaron y ayudaron en algo para llegar hasta acá.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Sandra Hernández, Directora de la Fundación Social de Holcim Colombia S.A., por su apoyo durante toda mi carrera.

Marjorie León, Coordinadora del Laboratorio de Control de Calidad de la Planta de Cemento de Holcim Colombia S.A por hacer posible este proyecto; por su permanente orientación y valiosos aportes.

Mario Álvarez, Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS, director de este proyecto, por su valiosa asesoría.

Lorena Londoño, Ingeniera del Laboratorio de Control de Calidad de la Planta de Cemento de Holcim Colombia S.A y tutora de este proyecto, por sus consejos y paciencia.

A los Técnicos del Laboratorio de Control de Calidad de la Planta de Cemento de Holcim Colombia S.A por su colaboración desinteresada a lo largo del proyecto en la realización de las pruebas.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	14
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	15
2.1. CEMENTO PORTLAND	15
2.2. CENIZAS VOLANTES	17
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	19
3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES	20
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO BASE Y LAS CENIZAS VOLANTES.....	20
3.3.1. Caracterización física	20
3.3.2. Caracterización química	21
3.4. PREPARACIÓN DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS	21
3.5. ANÁLISIS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES	22
3.6. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES	23
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR	24
4.1.1. Caracterización del cemento base	24
4.1.1.1. Caracterización física	24
4.1.1.2. Caracterización química	25
4.1.2. Caracterización de las cenizas volantes y clasificación	25

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES27

4.2.1. Análisis físicos y mecánicos27

4.2.1.1. Ensayo de compresión27

4.2.1.2. Consistencia normal del cemento hidráulico31

4.2.1.3. Tiempo de fraguado32

4.2.1.4. Calor de hidratación33

4.2.1.5. Densidad34

4.2.1.6. Finura35

4.2.2. Análisis químicos.....36

4.3. CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ADICIONADO37

5. CONCLUSIONES38

PERSPECTIVAS Y TRABAJO FUTURO39

BIBLIOGRAFÍA40

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico1. Resistencia de los cementos adicionados a 1 día	29
Grafico 2. Resistencia de los cementos adicionados a 3 días	29
Grafico 3. Resistencia de los cementos adicionados a 7 días	30
Grafico 4. Resistencia de los cementos adicionados a 28 días	30
Grafico 5. Consistencia normal para cemento adicionado con cenizas volantes	31
Grafico 6. Tiempo de fraguado para cemento adicionado con cenizas volantes	32
Grafico 7. Calor de hidratación a 7 días de cementos adicionados con cenizas volantes	33
Grafico 8. Calor de hidratación a 28 días de cementos adicionados con cenizas volantes	34
Grafico 9. Densidad de los cementos adicionados con cenizas volantes	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los compuestos del cemento	16
Tabla 2. Diseño estadístico de experimentos	19
Tabla 3. Análisis químicos del cemento base y las cenizas volantes	21
Tabla 4. Caracterización física de los cementos adicionados con cenizas volantes	22
Tabla 5. Resultados de la caracterización física del cemento base	24
Tabla 6. Composición química del cemento base.....	25
Tabla 7. Caracterización física de las cenizas volantes de Termopaipa.....	25
Tabla 8. Resultados promedio IAR de las cenizas volantes de Termopaipa	26
Tabla 9. Caracterización química de las cenizas volantes de Termopaipa.....	27
Tabla 10. Finura de los cementos adicionados con cenizas volantes.....	35
Tabla 11. Análisis químico de los cementos en función del porcentaje de adición de la muestra 1 de cenizas volantes	37
Tabla 12. Análisis químico de los cementos en función del porcentaje de adición de la muestra 2 de cenizas volantes	37

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Requisitos físico-químicos de las cenizas volantes	48
Anexo B. Especificaciones físicas y químicas del cemento Portland.....	47
Anexo C. Datos de resistencia a la compresión para cementos adicionados con cenizas volantes	49
Anexo D. Requerimiento de agua y tiempo de fraguado para cemento adicionado con cenizas volantes.....	53
Anexo E. Calor de hidratación del cemento adicionado con cenizas volantes	55
Anexo F. Datos de análisis químicos de los cementos adicionados con cenizas volantes	57
Anexo G. Procedimientos de caracterización del cemento adicionado con cenizas volantes	59
Anexo H. Clasificación de los cementos	61
Anexo I. Variación del análisis químico de los cementos adicionados respecto a la cantidad adicionada de cenizas volantes.....	63

TÍTULO: ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CEMENTO HIDRÁULICO ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES DE LA CENTRAL DE GENERACION TÉRMICA DE TERMOPAIPA*

AUTOR: BARRERA QUIJANO, Juan Carlos.**

PALABRAS CLAVES: Cemento, Ceniza Volante, Resistencia a la compresión.

RESUMEN:

La gran generación de sub-productos industriales es en la actualidad uno de los problemas más acuciantes, por lo que su gestión, reciclado y aprovechamiento constituyen el principal reto a resolver por las empresas productoras.

Entre estos sub-productos industriales, se encuentran las cenizas volantes. Una de las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos industriales, es su incorporación a los materiales de construcción y concretamente al cemento.

Las ventajas de usar un cemento adicionado con cenizas volantes incluyen, además del aumento de las prestaciones tecnológicas del material acabado, razones de carácter económico, por la disminución del costo de producción (al reducir importantes cantidades del clínker en la fabricación de cemento), razones de tipo ecológico por los graves problemas que el almacenamiento de las cenizas volantes origina en el entorno medio-ambiental y su contribución en la reducción del CO₂ generado en las plantas cementeras.

El procedimiento experimental consistió en la preparación de doce cementos, mezclando un cemento base con dos muestras de cenizas volantes, provenientes de la central de generación térmica de Termopaipa, en porcentajes en peso de adición de cenizas de 5, 10, 15, 20, 30, y 40. Tanto a los materiales utilizados como a los cementos adicionados obtenidos se les realizaron pruebas físicas y químicas para caracterizar y clasificar los cementos adicionados de acuerdo a la norma técnica colombiana.

El estudio reveló que la adición de cenizas volantes mejora la resistencia mecánica del cemento comparado con los requisitos mínimos exigidos para un cemento tipo 1 de acuerdo con la norma técnica colombiana. Igualmente se comprobó que la adición confiere al cemento una reducción en su calor de hidratación y un aumento en el requerimiento de agua. Con los resultados obtenidos se concluyó que el material modificado cumple a cabalidad con los requerimientos exigidos para un cemento tipo 1 por la norma técnica colombiana.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Ph.D Mario Álvarez

TITLE: ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOR OF HYDRAULIC CEMENT ADDED WITH FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANT OF TERMOPAIPA. *

Author: BARRERA QUIJANO, Juan Carlos.**

Keywords: Cement, Fly Ash, Compressive strength.

Abstract:

The great generation of industrial by-products is currently one of the most pressing problems, so their management, recycling and reuse is the main challenge to be solved by producer companies.

Among the by-products we can find the fly ash. One of the possible uses of this industrial waste is its incorporation into building materials and specifically into the cement.

The advantages of the use of the cement added with fly ash includes, besides the increase of the technological features of the finished material, economic reasons, because of the reduction of production costs (by reducing the amounts of clinker in the cement production), environmental reasons because it turns into a solution of the storage problem and it contributes in the reduction of the CO₂ generated in cement plants.

The experimental procedure consisted in preparation of twelve cements, mixing a cement base with two fly ash samples from thermal power plant of Termopaipa in percentages of adding 5, 10, 15, 20, 30 and 40. Both materials used as cements added obtained were done physical and chemical tests to characterize and classify cements added according to the Colombian technical standard.

The study revealed that the addition of fly ash compressive strength development of cement compared with the minimum requirements for a cement type 1 according to the Colombian technical standard. Also, it was proved that the addition gives the cement a reduction in its heat of hydration and an increase in its water requirement. With the results obtained, the conclusion is that the cement produced fulfills completely the requirements for a cement type 1 by the Colombian technical standard.

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physic- chemical Engineering. School of Chemical Engineering
Director: Ph.D Mario Álvarez

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y características del cemento producido y la posibilidad de optimización del proceso de fabricación. Hoy en día la mayoría de las mezclas de cemento contienen adiciones que reemplazan un porcentaje del clinker al incorporarlas en la molienda del producto final.

Los materiales cementantes suplementarios como las cenizas volantes, le permiten a la industria del cemento utilizar cientos de toneladas de este subproducto. Por otro lado, su utilización reduce el consumo de clinker por unidad de masa de cemento Portland y confieren a la mezcla propiedades mecánicas y de durabilidad.

La hipótesis fundamental de esta investigación está basada en que la incorporación de cenizas volantes al cemento, permite obtener un producto adicionado que cumple con los requerimientos físicos y químicos expuestos en las normas NTC 121: Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas y la NTC 321: Cemento Portland. Especificaciones químicas.

En este trabajo de investigación se evaluó el impacto de la adición de cenizas volantes provenientes de la central de generación térmica de Termopaipa (propiedad de Gestión Energética S.A. E.S.P – GENSA), en las características físicas y químicas, del cemento.

Se encontró que las cenizas volantes, retardan el tiempo de fraguado, el desarrollo de resistencias es mayor que para un cemento tipo 1 de acuerdo a la norma NTC 121, aumentan el requerimiento de agua de la pasta de cemento y reducen el calor de hidratación, a medida que aumenta la cantidad de ceniza adicionada. Dichos efectos dependen de factores químicos, morfológicos y de actividad propios de la adición.

2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland es un ligamento hidráulico, es decir es un material artificial de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molido y mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad tanto al aire como bajo el agua.

Como materias primas para la fabricación del cemento se utilizan la caliza y sustancias arcillosas naturales (arcillas, margas, etc.), que mezclándose en proporciones adecuadas, se muelen y homogenizan, introduciéndose la mezcla así obtenida en hornos casi exclusivamente giratorios, en donde se sinterizan a temperaturas de 1000 - 1500°C.

Después de la cocción de las materias primas durante el período requerido, el clínker resultante es enfriado y molido (molturación) con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), que es utilizado en una pequeña proporción (usualmente entre el 5 y el 8%) para regular el fraguado (perdida de plasticidad) del cemento.

El cemento Portland está constituido por cuatro compuestos principales, conocidos normalmente como silicato tricálcico C_3S , Silicato dicálcico C_2S , Aluminato tricálcico C_3A y Ferroaluminato tetracálcico C_4AF (Ver tabla 1). Las características de los diferentes tipos de cemento Portland, dependen del porcentaje de cada uno de estos compuestos químicos.

Tabla 1. Características de los compuestos del cemento¹

COMPUESTO	CARACTERÍSTICAS
C₃S	Contribuye de manera muy importante a las resistencias iniciales, siendo su velocidad de hidratación alta, así también desarrolla un alto calor de hidratación.
C₂S	Tiene una lenta velocidad de hidratación y desarrollo de calor de hidratación bajo. Su estabilidad química es bastante buena, por lo que el uso de cementos con alto contenido de C ₂ S para producir concretos resistentes al ataque de sulfatos es muy recomendable.
C₃A	Su fraguado ocurre a una velocidad de hidratación muy alta, hasta el punto de ser casi instantáneo. El aluminato tricálcico contribuye en las resistencias durante las primeras horas, su calor de hidratación es muy elevado. Es muy sensible a la acción de sulfatos y cloruros, debido a la formación de sales del tipo sulfoaluminatos y cloroaluminatos, la formación de estas sales es de carácter expansivo, pudiendo originar agrietamiento y desintegración del concreto.
C₄AF	Presenta una alta estabilidad química, los cementos ricos en este compuesto tienen condiciones de empleo específicas en todos aquellos casos en que importe más la durabilidad frente a los ataques químicos, que las resistencias mecánicas.

Los cementos se clasifican según los requerimientos físicos y químicos de acuerdo con las normas NTC 121 y NTC 321 (ver anexo B). Para comprobar que el cemento cumple dichos requerimientos, se realizan ensayos de caracterización, referenciados en normas, que permiten determinar su clasificación. Las normas técnicas utilizadas en la caracterización del cemento adicionado con cenizas preparado para este proyecto fueron:

- ASTM C 1437: Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico).
- NTC 33: método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire.

¹ CARDOZO, Víctor y otros. Composición-química-del-cemento .8 de mayo de 2010. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/24863679/Composicion-Quimica-Del-Cemento>

- NTC 110: método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico.
- NTC 117: método de ensayo para determinar el calor de hidratación del cemento hidráulico.
- NTC 118: método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.
- NTC 184: métodos de análisis químicos de los cementos hidráulicos.
- NTC 220: determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado.
- NTC 221: método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.
- NTC 4985: método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del equipo de barrido por aire.

2.2. CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son conocidas comúnmente como una “puzolana artificial”. De acuerdo con la norma NTC 3493: Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Portland, una puzolana se define como “Un material silíceo o silico-aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que en forma de partículas finas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes”.

Las cenizas volantes están compuestas por residuos sólidos finamente divididos resultantes de la calcinación de argilo-minerales, carbonatos, sulfatos y otros contenidos en el carbón, formados en la cámara de combustión de las calderas de las centrales térmicas.

Al interior de las calderas, la temperatura de la llama llega a tener entre 1370°C y 1700°C, con tiempos disponibles para la quema de las partículas combustibles entre uno y dos segundos. Después de la combustión, las cenizas formadas son transportadas por el flujo de los gases y son colectadas en ciclones mecánicos o precipitadores electrostáticos. Las características de las cenizas volantes pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema.

La cantidad de ceniza volante en el cemento puede variar entre el 5 y el 65% en peso del material cementante según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al cemento. La norma NTC 3493, especifica los requisitos que deben cumplir las cenizas volantes como aditivos minerales y considera dos diferentes clases de cenizas (Ver anexo A) identificadas como:

Clase F: Cenizas volantes normalmente producidas en la quema del carbón antracítico o bituminoso, que cumpla con los requisitos aplicables para esta clase, especificados en la norma. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas y generalmente poseen un contenido bajo de calcio; la fase vítrea formada al enfriar súbitamente los minerales fundidos en el proceso de combustión del carbón, es la única fase activa que presenta propiedades puzolánicas.

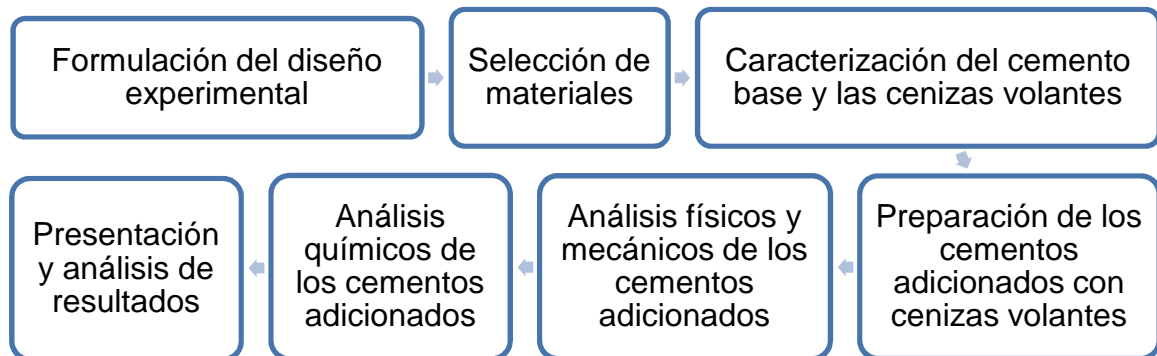
Clase C: Cenizas volantes producidas a partir de carbón lignítico o sub bituminoso, que cumple con los requisitos aplicables de esta clase, especificados en la norma. Algunas cenizas de la clase C pueden tener contenidos de cal, mayores al 10%. Las cenizas de clase C poseen típicamente propiedades puzolánicas y cementantes.

Para la caracterización de las cenizas utilizadas en este proyecto se utilizó como referencia para los ensayos la norma NTC 3823: muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales, para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos la metodología seguida en esta investigación ha comprendido las siguientes etapas,

Figura 1. Metodología de investigación



3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

La siguiente tabla resume el diseño experimental para el proyecto de adición de cenizas volantes al cemento Portland.

Tabla 2. Diseño estadístico de experimentos

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Variable independiente	Porcentaje de ceniza en masa adicionada al cemento base
Variable dependiente	Resistencia a la compresión. (Parámetro fijado por el laboratorio de control de calidad de Holcim Colombia S.A.)
Niveles de tratamiento	Adición de cenizas en porcentajes en peso de 5, 10, 15, 20, 30, 40 equivalentes a 6 tratamientos, por muestra
Número de repeticiones	3 experimentos por nivel

3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES

Consistió en la toma de dos muestras de cenizas volantes provenientes del proceso de quema de carbón de la central de generación térmica de Termopaipa (la cual es una generadora de energía eléctrica a base de vapor a través de carbón bituminoso pulverizado; ubicada en el Kilómetro 3 vía Paipa – Tunja).

La primera muestra se recolectó en el mes de septiembre de 2009 y la segunda muestra se tomó en enero de 2010, esto con el objetivo de evaluar la estabilidad del proceso de combustión en la termoeléctrica. Las muestras tomadas se recogieron en el patio de disposición, a fin de eliminar el sitio de recolección, como variable del experimento.

Luego de tener cada muestra, éstas se procedieron a secar para retirar el agua agregada en el patio de disposición y luego realizar su caracterización.

El cemento utilizado en el estudio, mezclado con la ceniza volante fue el cemento Portland tipo 2 producido por Holcim Colombia S.A. que por su mayor tamaño de partícula permite molerlo junto con las cenizas hasta la finura requerida.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO BASE Y LAS CENIZAS VOLANTES

3.3.1. Caracterización física

Se determinó la caracterización del cemento Portland utilizado, realizando los ensayos de densidad, superficie específica y finura, descritos en las normas NTC 22, NTC 33 y NTC 4985, respectivamente. A las dos muestras de cenizas volantes se les realizaron los análisis mencionados anteriormente de acuerdo a la norma NTC 3823 y también se les realizó el análisis de índice de actividad a la resistencia (IAR) cuyo método de ensayo se especifica también en la norma NTC 3823 y es requisito exigido por la norma NTC 3493.

3.3.2. Caracterización química

Tabla 3. Análisis químicos del cemento base y las cenizas volantes

ANÁLISIS	OBJETO
Óxidos por fluorescencia de rayos X (XRF)	Se analizó la muestra fundida en perla, por fluorescencia de rayos X en el equipo ARL 9800. Este análisis permite cuantificar la proporción de óxidos en el cemento como: el sistema cuaternario $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$, los cuales tienen que estar relacionados entre sí en proporciones pre-establecidas, con el objeto de dar determinadas características al clinker que de ellos se obtiene.
SO_3 por sulfurómetro	Este ensayo se utilizó para determinar el contenido de trióxido de azufre, utilizando el equipo Leco S632. El contenido de SO_3 decide la calidad del cemento por varios motivos: cuando es menor al 2% el fraguado puede ser muy rápido, pero en porcentajes del 6% al 10%, inhibe el fraguado.
Residuo insoluble	Se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NTC 184. Proviene principalmente del contenido de sílice no reactiva, de las impurezas del yeso, de las adiciones, y eventualmente de material no bien calcinado.
Cloruros por titulación potenciométrica	Se determinó el contenido de cloruros de la muestra a analizar por ataque químico y posterior titulación con nitrato de plata. Su fin es cumplir con la normatividad ambiental.
Perdidas al fuego	Se determinaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 184 para el caso del cemento base. Para las cenizas se siguió el método presentado en la norma NTC 3823. Mide la cantidad de anhídrido carbónico de los carbonatos presentes así como la cantidad de agua de hidratación incorporada al aglomerante por la misma causa.

3.4. PREPARACIÓN DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS

Se pesó la cantidad de material requerido para cada análisis de caracterización (ver anexo G) de acuerdo con el porcentaje en masa de adición de cenizas a mezclar junto con el cemento base hasta una finura comprendida en un rango de 1,5 a 2 % de retenido en malla 325, ensayo realizado de acuerdo a la norma NTC 294.

3.5. ANÁLISIS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES

Su objeto es determinar si los cementos adicionados con ceniza cumplen con los requisitos exigidos por la norma NTC 121.

Tabla 4. Caracterización física de los cementos adicionados con cenizas volantes

ANALISIS	OBJETO
Ensayo de resistencia a la compresión	Este ensayo realizado de acuerdo a la norma NTC 220, proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico.
Consistencia normal	Se elaboraron tres ensayos por muestra de acuerdo con la norma NTC 110, para determinar la cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.
Tiempo de fraguado	Se utiliza para determinar el tiempo que tarda la pasta en adquirir rigidez. Se elaboraron tres ensayos por muestra de cenizas volantes adicionada de acuerdo con la norma NTC 118.
Calor de hidratación	La determinación del calor de hidratación de los cementos adicionados provee información útil sobre la elevación de la temperatura en concretos masivos. Alto calor de hidratación puede ocasionar problemas de fisuras en el hormigón. Para cada muestra de cemento adicionado con cenizas se determinó el calor de hidratación, de acuerdo a la norma NTC 117.
Densidad	La determinación del ensayo de densidad es un factor indispensable para el diseño y control de calidad de las mezclas de concreto. Se determinó la densidad de cada uno de los cementos adicionados con cenizas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 221.
Finura	La importancia de la finura del cemento radica en la influencia que puede tener sobre la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado. En la investigación se estudiaron dos métodos; como método directo, se desarrolló el tamizado en malla de 45 μm , descrito en la norma NTC 4985. Como método indirecto se desarrolló el ensayo del permeabilímetro de Blaine, descrito en la norma NTC 33.

3.6. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES

Estos tienen por objeto determinar si las muestras a analizar cumplen con las especificaciones químicas de los tipos de cemento hidráulico referidos en la norma NTC 321. Los análisis de caracterización química que se realizaron para los cementos adicionados con cenizas, fueron los mismos que se describieron en la tabla 3.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de la fase experimental de esta investigación comprende diversos ensayos que permiten la caracterización del cemento adicionado con cenizas volantes, frente a su comportamiento físico, mecánico y químico.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR

4.1.1. Caracterización del cemento base

4.1.1.1. Caracterización física

Tabla 5. Resultados de la caracterización física del cemento base

PARAMETRO	RESULTADO
SUPERFICIE ESPECIFICA (m ² /Kg)	327,6
RETENIDO TAMIZ 45 μm %	11,89
DENSIDAD Kg/m ³	3210

El cemento utilizado en el estudio, adjunto con la ceniza volante para la mezcla fue el cemento Portland tipo 2. Este tipo de cemento se fabrica para ser empleado en construcciones de concreto, las cuales han de estar expuestas al ataque moderado por los sulfatos (sulfato soluble en el suelo como SO₄: 0,1 – 0,2% o sulfatos en agua: 150 – 1500 ppm) o en aquellos casos en que se requiere moderado calor de hidratación. Además, de las propiedades que caracteriza al cemento tipo I, estos cementos presentan menores cambios de volumen, menor tendencia a la exudación, moderada resistencia al ataque de sulfatos y menor generación de calor de hidratación.

4.1.1.2. Caracterización química

Tabla 6. Composición química del cemento base

COMPONENTE	% EN PESO	MÉTODO EMPLEADO
SiO ₂	20,32	Fluorescencia de Rayos X
Al ₂ O ₃	5,44	
Fe ₂ O ₃	4,10	
CaO	63,60	
MgO	1,13	
P ₂ O ₅	0,32	
Mn ₂ O ₃	0,05	
K ₂ O	0,81	
Na ₂ O	0,21	
SO ₃	2,32	
Cloruros	0,043	NTC 184
Perdidas al fuego	1,43	
Residuo insoluble	1,09	

4.1.2. Caracterización de las cenizas volantes y clasificación

La tabla 7 presenta los datos obtenidos de la caracterización física de las dos muestras de cenizas de Termopaipa.

Tabla 7. Caracterización física de las cenizas volantes de Termopaipa

ENSAYO	MUESTRA #1	MUESTRA #2
SUPERFICIE ESPECIFICA (m ² /kg)	327,7	335,0
RETENIDO TAMIZ 45 µm %	31,96	36,42
DENSIDAD (Kg/m ³)	2210	2090

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos, para el ensayo de IAR.

Tabla 8. Resultados promedio IAR de las cenizas volantes de Termopaipa

TIPO DE CENIZA		RESISTENCIA MPa		IAR (%)	
		7 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
MUESTRA #1	CONTROL	26,53	34,40	75,0	86,4
	ENSAYO	19,74	29,97		
MUESTRA #2	CONTROL	26,59	32,97	73,0	88,2
	ENSAYO	19,37	28,77		

Dado que la norma NTC 3493 especifica que cumplir con el índice de actividad de resistencia a los 7 días o 28 días, indica el cumplimiento de la norma, es así que a los 28 días el ensayo realizado en este proyecto supera el mínimo porcentaje de control (75%) con cemento Portland.

A continuación se presentan los resultados de los requisitos de la norma NTC 3493 en relación al análisis químico propio de cada una de las cenizas. Para la determinación de estos se utilizó como referencia la norma NTC 3823.

Tabla 9. Caracterización química de las cenizas volantes de Termopaipa

COMPONENTE	Muestra #1	Muestra #2
	% EN PESO	% EN PESO
SiO ₂	52,43	54,18
Al ₂ O ₃	19,39	19,96
Fe ₂ O ₃	4,72	5,01
CaO	0,68	0,78
K ₂ O	1,26	1,30
MgO	0,41	0,33
SO ₃	0,48	0,48
Cloruros	0,05	0,05
Perdidas al fuego	16,59	14,31
Residuo insoluble	78,03	78,83

Teniendo en cuenta la clasificación de las cenizas en la norma NTC 3493 (ver anexo A), las cenizas estudiadas corresponden a la clase F, normalmente conocidas como cenizas silíceas, producto de la quema del carbón bituminoso. Su contenido de inquemados (carbón remanente de la combustión) puede llegar a sobrepasar los límites dados por la norma, debido posiblemente a una baja eficiencia en el proceso de combustión en la central térmica de Termopaipa.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES

Los datos de caracterización obtenidos en el laboratorio de control de calidad de Holcim Colombia S.A., serán presentados como anexos en este libro, por lo tanto en este capítulo trataremos únicamente los resultados como tal, es decir tabulados, representados y con sus respectivos análisis.

4.2.1. Análisis físicos y mecánicos

4.2.1.1. Ensayo de compresión

La resistencia a la compresión de los cementos adicionados con cenizas volantes varía de acuerdo con la cantidad de ceniza utilizada (ver gráficos 1, 2, 3, y 4), se observa a edades tempranas una disminución pronunciada de las resistencias a medida que aumenta el porcentaje de adición.

A 28 días existe un leve aumento en el desarrollo de resistencias para cementos adicionados con ceniza hasta un 15%; a partir de dicho porcentaje disminuye la resistencia a la compresión.

La muestra de ceniza volante parece no influenciar de manera significativa en el comportamiento mecánico de los especímenes moldeados para las diferentes edades de ensayo.

La influencia de las cenizas volantes en el desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento hidratado y, por lo tanto, en sus reacciones de hidratación, es diferente en función de la edad del material.

Normalmente la actividad puzolánica, no comienza a edades tempranas de la hidratación del cemento. Como consecuencia, a dichas edades, las cenizas actúan como un material inerte, la porosidad es superior y por lo tanto, la resistencia es menor en presencia de cenizas volantes (efecto que se puede compensar con una molienda más fina); mientras que a edades tardías, y a medida que evoluciona la actividad puzolánica, se produce un refinamiento de la estructura porosa y un aumento de densidad en la estructura y resistencias mecánicas, que pueden llegar a superar a las del cemento ordinario².

El proceso de hidratación se desarrolla de la siguiente manera: las partículas vítreas de las cenizas reaccionan con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento, formándose los hidratos de Ca-Si (C_3S y C_2S) principalmente, estos son responsables en gran parte del desarrollo de resistencia; pero esta reacción se tarda más que en el cemento normal, lo cual conduce a un lento desarrollo de resistencias, siendo a largo plazo el efecto despreciable.³

La precipitación de $CaOH_2$ y gel CSH (silicato cálcico hidratado) sobre la superficie de las esferas de las cenizas, puede ser un impedimento para el desarrollo de su reactividad puzolánica. Sin embargo, y dependiendo del grado de alcalinidad de la fase acuosa, la parte vítrea de las cenizas se irá disolviendo, reactivándose así la actividad puzolánica, Roy (1989) y Jawed y col. (1991).

² Molina, Omar. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 2008

³ Ibíd.

Gráfico 1. Resistencia de los cementos adicionados a 1 día

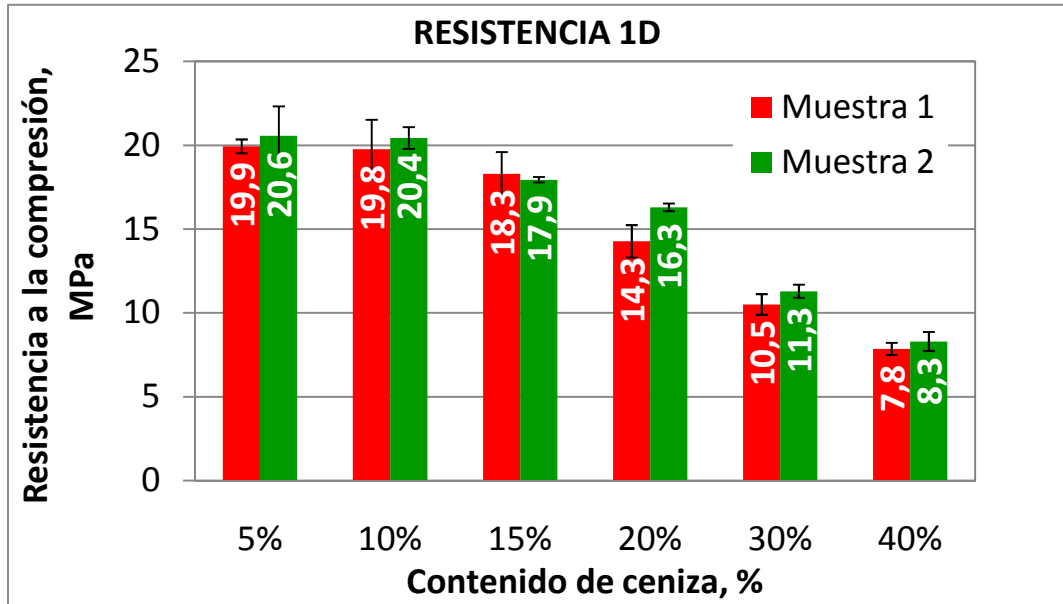


Gráfico 2. Resistencia de los cementos adicionados a 3 días

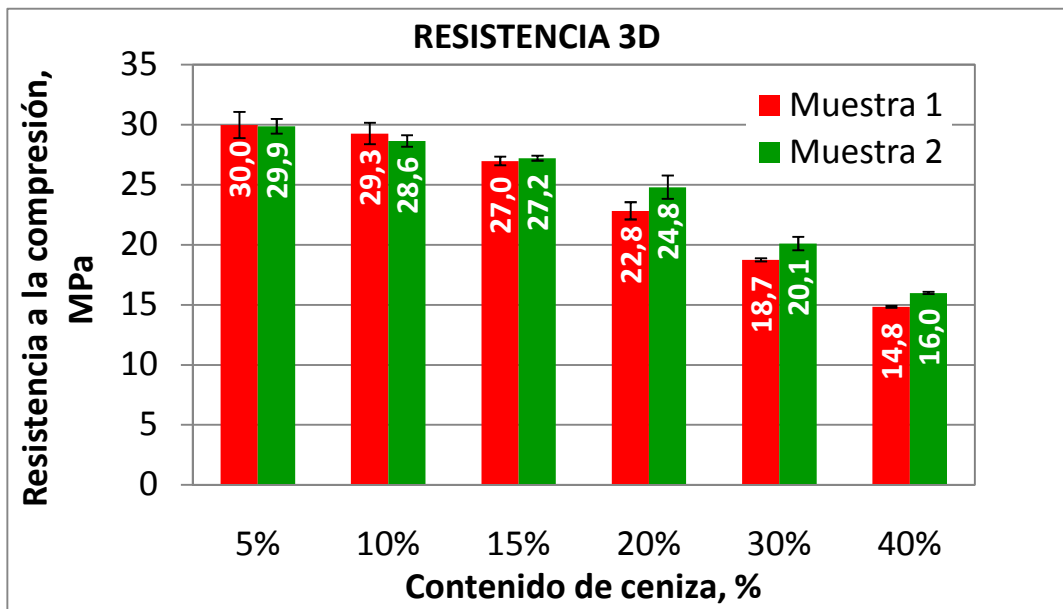


Gráfico 3. Resistencia de los cementos adicionados a 7 días

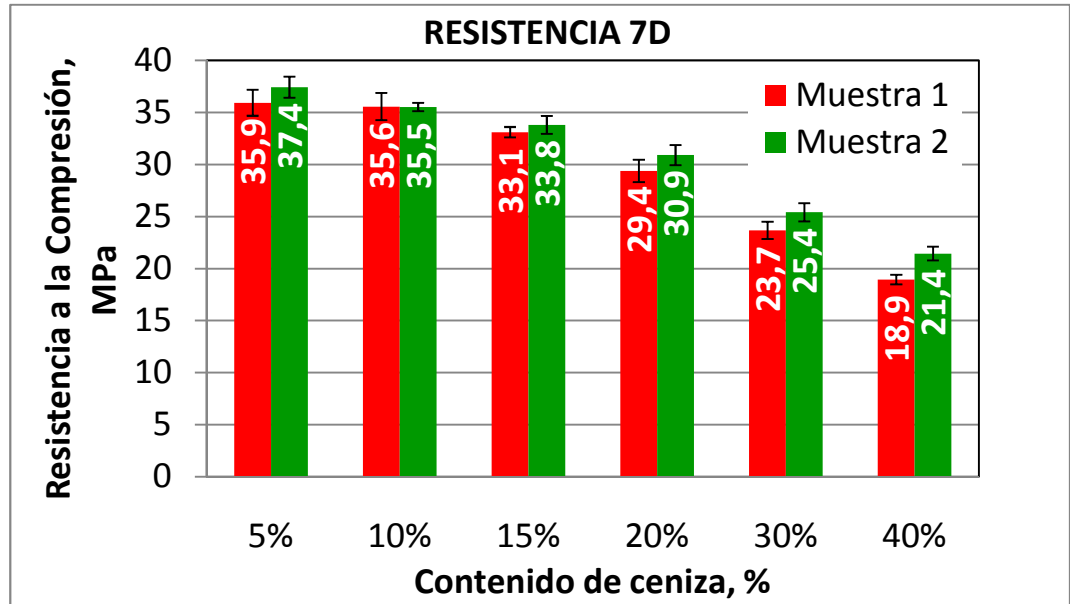
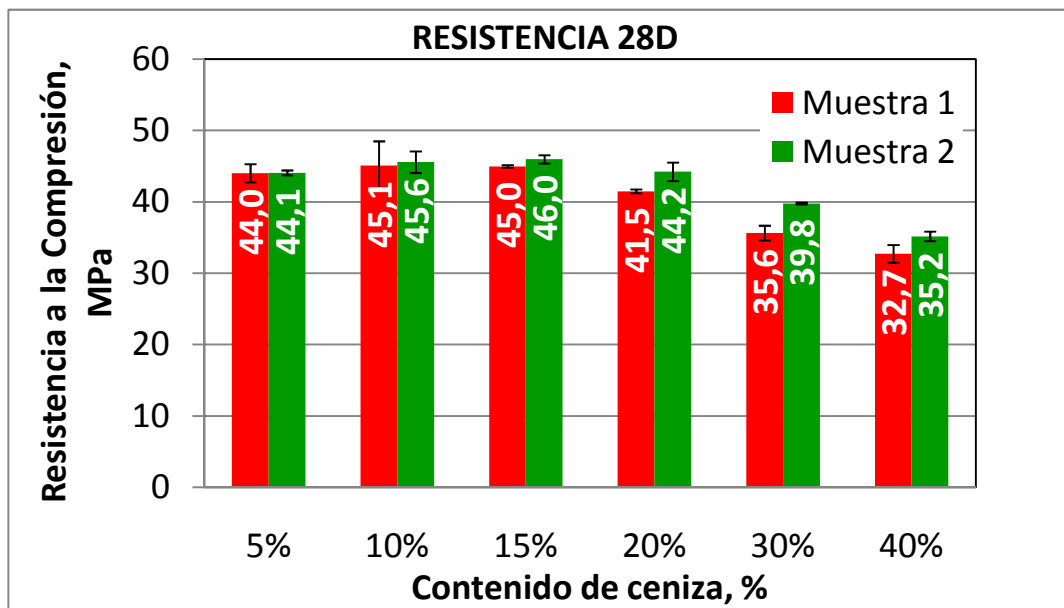
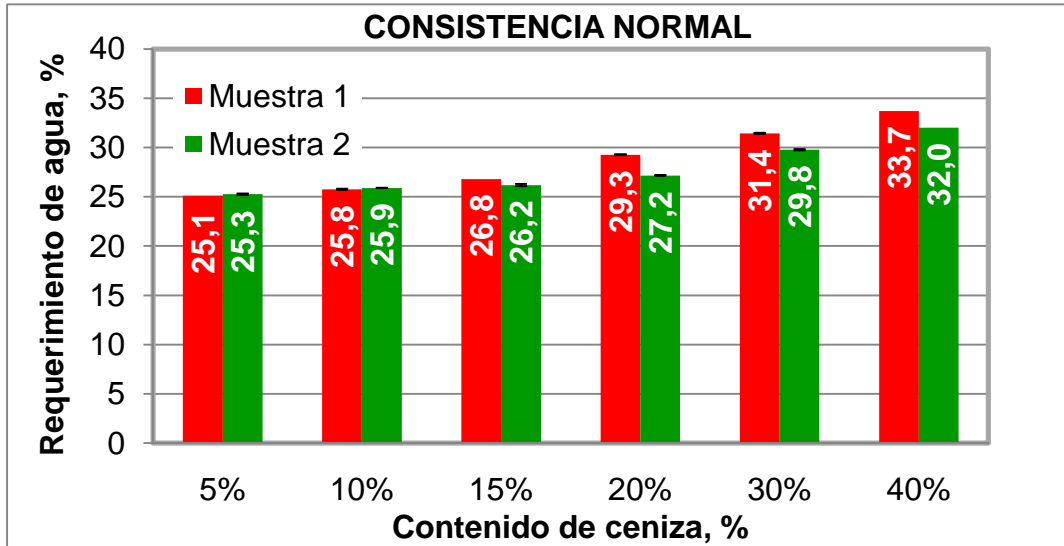


Gráfico. 4. Resistencia de los cementos adicionados a 28 días



4.2.1.2. Consistencia normal del cemento hidráulico

Gráfico 5. Consistencia normal para cemento adicionado con cenizas volantes



Se hace notable un aumento en la cantidad de agua requerida por los cementos adicionados con cenizas (ver gráfico 5), debido a un mayor contenido de carbón remanente, puesto que éste por su porosidad genera un efecto absorbente.

El volumen de partículas finas en la mezcla aumenta, al sustituir cemento por cenizas, por la menor densidad de las últimas. El cemento adicionado se vuelve menos dócil y necesita agua adicional, sin embargo, las cenizas pueden mejorar la trabajabilidad, por el tamaño y forma esférica de sus partículas⁴.

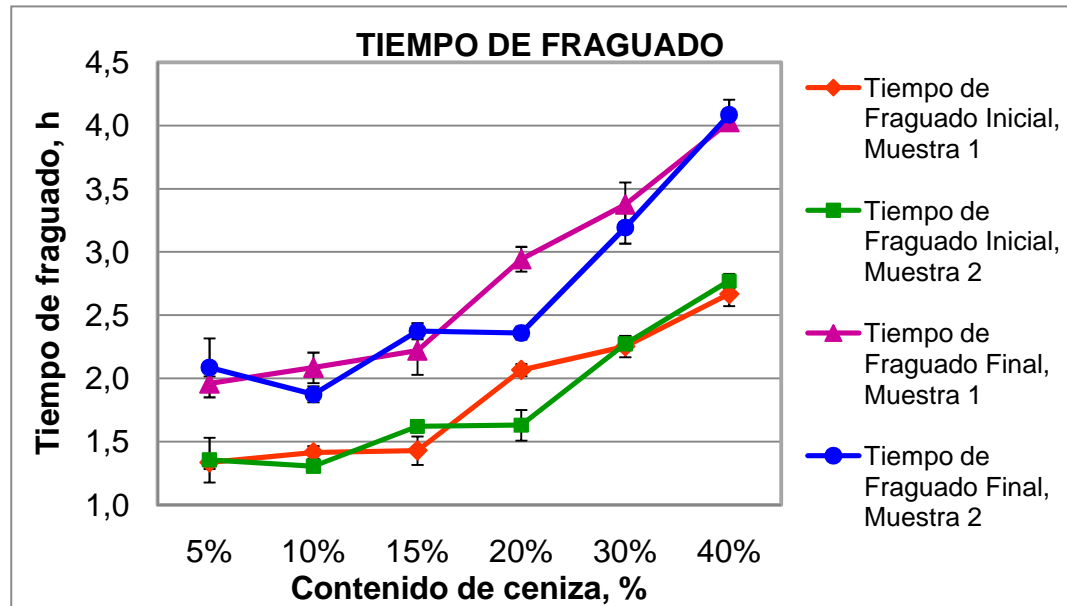
A medida que aumenta el agua necesaria para la hidratación del cemento aumenta la porosidad del mismo. Esto quiere decir que el agua que no reacciona

⁴ García, María Paz. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado. Tesis De Doctorado. Universidad Complutense De Madrid. Madrid, España. 1993

en el proceso de hidratación se aloja en los poros de la pasta de cemento, facilitando la entrada de agentes agresivos.⁵

4.2.1.3. Tiempo de fraguado

Gráfico 6. Tiempo de fraguado para cemento adicionado con cenizas volantes



Existe un comportamiento similar entre los tiempos de fraguado de los cementos adicionados con las dos muestras de cenizas, además de notarse incrementos más pronunciados de los tiempos de fraguado de las muestras adicionadas con más de un 15 % de cenizas volantes (ver gráfico 6).

Dicho comportamiento podría deberse a un aumento en la cantidad de cenizas adicionadas y la proporción de carbón presente en ellas. Es así como el carbón residual retarda los tiempos de fraguado debido a la resistencia adicional que presenta en las reacciones de hidratación y además porque promueve la segregación del agua de mezclado.

⁵ Ibíd.

4.2.1.4. Calor de hidratación

La determinación del calor de hidratación de los cementos adicionados provee información útil sobre la elevación de la temperatura en concretos masivos, debido a que la hidratación de los constituyentes del cemento, es una reacción exotérmica, así cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede ocasionar problemas de fisuras en el hormigón.

La evaluación a 7 días y 28 días de los calores de hidratación de los cementos adicionados, presenta una disminución de sus valores con respecto a un aumento del contenido de cenizas en los cementos adicionados (ver gráficos 7 y 8) y parece no cambiar con la muestra de ceniza empleada. Debido a que el calor de hidratación depende de la composición química del clinker, la tendencia de dicha disminución en el calor de hidratación de los cementos adicionados, se debe a la reducción en el contenido de clinker a medida que aumenta la cantidad de ceniza adicionada.

Gráfico 7. Calor de hidratación a 7 días de cementos adicionados con cenizas volantes

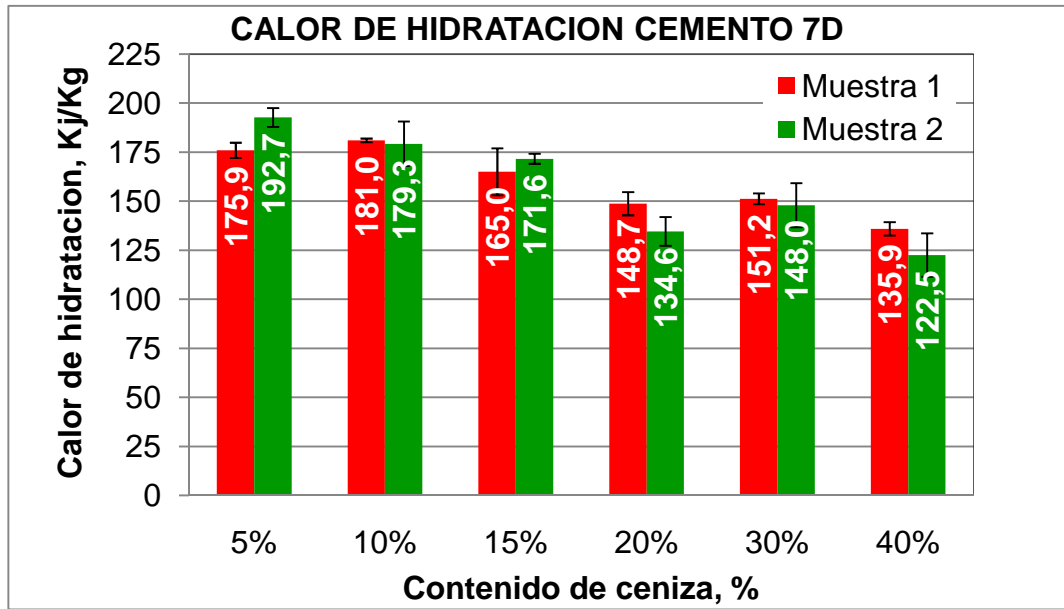
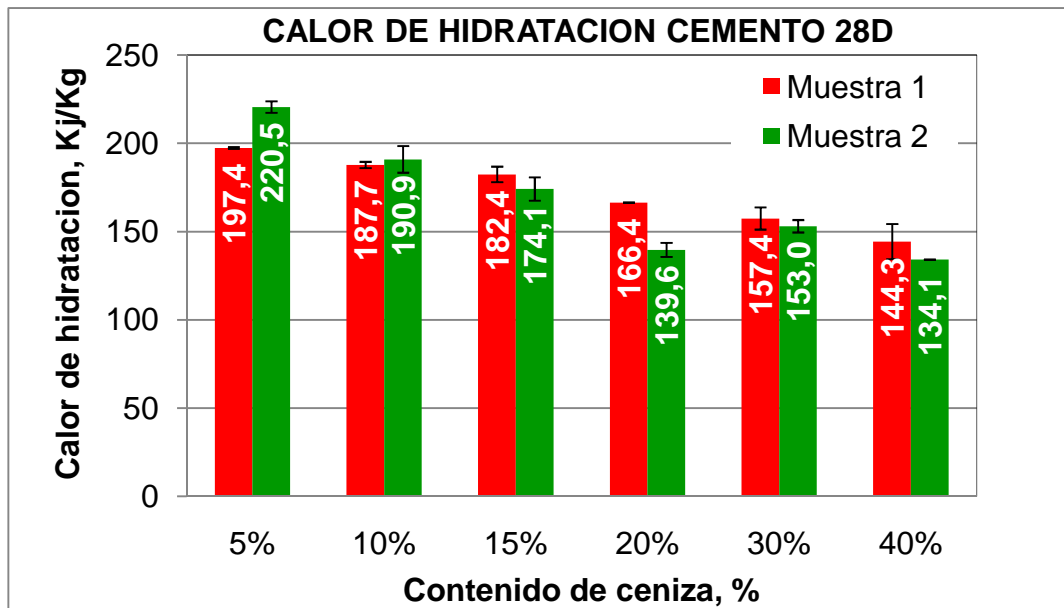
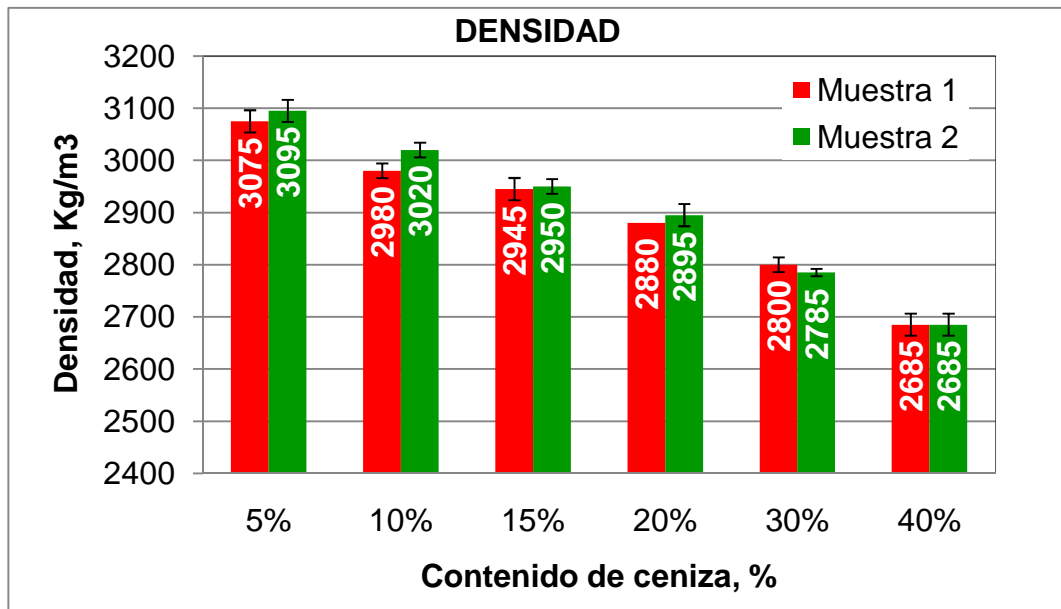


Gráfico 8. Calor de hidratación a 28 días de cementos adicionados con cenizas volantes



4.2.1.5. Densidad

Gráfico 9. Densidad de los cementos adicionados con cenizas volantes



Se observa una disminución de la densidad con respecto al aumento en el porcentaje de adición (ver gráfico 9) debido a que las cenizas presentan una menor densidad con respecto al cemento base. Los cementos adicionados proporcionan una mayor cantidad de pasta para un mismo peso de cemento, esto mejora las características de trabajabilidad de los concretos elaborados con estos cementos.

Además se utiliza en el cálculo del contenido total de agregados y de la densidad del hormigón. Este factor es importante para el diseño de mezcla porque con él podemos determinar la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto.

4.2.1.6. Finura

Tabla 10. Finura de los cementos adicionados con cenizas volantes

Contenido de Ceniza	Cemento adicionado con cenizas muestra 1		Cemento adicionado con cenizas muestra 2	
	Superficie específica (m ² /kg)	Retenido tamiz 45 μm %	Superficie específica (m ² /kg)	Retenido tamiz 45 μm %
5%	565,0 ± 9,3	1,58 ± 0,03	538,0 ± 3,2	1,73 ± 0,0

10%	541,2 ± 6,5	1,61 ± 0,01	550,1 ± 3,0	1,64 ± 0,01
15%	516,8 ± 5,5	1,84 ± 0,07	548,0 ± 7,2	1,77 ± 0,09
20%	562,6 ± 0,5	1,81 ± 0,01	549,5 ± 2,0	1,87 ± 0,04
30%	523,0 ± 6,4	1,53 ± 0,03	519,8 ± 7,5	1,88 ± 0,03
40%	530,6 ± 4,3	1,64 ± 0,01	530,8 ± 6,2	1,85 ± 0,01

La finura resulta ser uno de los parámetros más importantes para aumentar la capacidad de reacciones con efecto puzolánico en las cenizas volantes, pues se ha demostrado, que en las reacciones de hidratación del cemento solamente las superficies exteriores de las partículas pueden tomar parte, es por ello que deben llevarse a un mayor nivel de finura. De tal forma que las áreas superficiales de las estructuras silíceas esféricas, contenidas en las cenizas volantes estén disponibles para la reacción química en un mayor porcentaje.

4.2.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

De acuerdo a las tablas 11 y 12 (ver variación del análisis químico en el anexo I), un mayor valor de pérdidas al fuego (P.F.) de los cementos adicionados es un indicativo de la presencia de un mayor contenido de carbón inquemado en dicha muestra. La sílice de las cenizas volantes repercute en un aumento del residuo insoluble (R.I.). Un cemento sin adiciones da un valor de residuo insoluble de alrededor de 0,5%, esto se debe a que casi todos los componentes del cemento Portland son solubles en HCl excepto la sílice no reactiva.

La contribución de los compuestos alumínicos y ferríticos a las propiedades mecánicas del cemento es baja, pero adquiere relevancia en términos de durabilidad por sus elevadas reactividades en medios sulfatados.

La disminución en los óxidos de magnesio y trióxido de azufre evidencia que la mayor parte de la concentración de dichos óxidos es aportada por el cemento base y que el contenido de los mismos en las dos muestras de ceniza es bajo.

Debido a su contenido en los cementos adicionados y sabiendo que el MgO se hidrata lentamente y da lugar a una reacción expansiva, capaz de fisurar el hormigón endurecido, podemos afirmar que dicha reacción de expansión será poco probable de llevarse a cabo a medida que aumenta la adición de cenizas. El contenido de SO₃ tiene una importancia significativa en la resistencia y estabilidad de volumen. Hasta cierto punto, dependiendo de la composición del clinker el contenido de SO₃ promueve la resistencia del cemento y evita las contracciones. Sin embargo si el contenido de SO₃ sobrepasa un cierto límite puede provocar una notable expansión en el concreto⁶. Además el contenido de SO₃ influye en el tiempo de fraguado, a menor concentración de dicho compuesto, mayor tiempo de fraguado para los cementos adicionados con cenizas.

Tabla 11. Análisis químico de los cementos en función del porcentaje de adición de la muestra 1 de cenizas

CONTENIDO DE CENIZA	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	P.F.	R.I.
5%	21,71	6,15	4,24	1,10	2,47	2,33	4,70
10%	23,60	7,03	4,38	1,13	2,45	2,94	8,53
15%	25,19	7,75	4,57	1,09	2,36	3,88	11,99
20%	27,98	9,18	4,80	1,03	2,19	4,69	18,86
30%	30,65	10,12	4,99	0,93	2,03	5,80	21,75
40%	33,09	11,67	5,19	0,94	1,86	7,32	31,31

Tabla 12. Análisis químico de los cementos en función del porcentaje de adición de la muestra 2 de cenizas

CONTENIDO DE CENIZA	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	P.F.	R.I.
5%	21,89	6,24	4,27	1,15	2,51	2,25	5,51
10%	23,48	7,04	4,40	1,12	2,40	2,80	9,51
15%	25,34	7,79	4,57	1,08	2,32	3,56	12,40

⁶ Martínez, Oscar. Curso de tecnología del cemento. Cementos Apasco, Planta Ramos Arizpe. Cementos Boyacá. 1996.

20%	27,11	8,54	4,73	1,04	2,20	4,11	16,99
30%	31,04	10,30	4,91	1,00	2,05	5,38	24,95
40%	34,27	11,29	5,26	0,94	1,86	6,49	32,20

4.3. CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES

Según las especificaciones descritas en las normas NTC 321 y NTC 121, y los resultados de caracterización de los cementos adicionados preparados para este proyecto, presentados anteriormente, se puede afirmar que dichos cementos cumplen con los requisitos correspondientes al cemento Portland tipo 1 (ver anexos B y H). Además de cumplir con los requisitos mecánicos de un cemento tipo 1 mejorado, para adiciones menores o iguales al 30%.

5. CONCLUSIONES

- El contenido de carbón remanente de las cenizas adicionadas al cemento base disminuye la velocidad de las reacciones puzolánicas y el desarrollo de resistencias mecánicas, como consecuencia a edades tempranas las cenizas actúan como material inerte; mientras a edades tardías se produce un refinamiento de la estructura porosa y un aumento tanto en la densidad de la estructura como en la resistencia mecánica.
- La porosidad del carbón remanente en las cenizas adicionadas al cemento genera un efecto absorbente, aumentando el requerimiento de agua y retardando los tiempos de fraguado debido a la resistencia adicional que presenta el carbón en las reacciones de hidratación y además porque promueve la segregación del agua de mezclado.

- Los cementos adicionados con cenizas volantes provenientes de la central de generación térmica de Termopaipa, preparados para este proyecto cumplen con las especificaciones físicas y químicas expuestas en las normas técnicas colombianas NTC 121 y NTC 321, para un cemento tipo 1; recomendándose la adición de cenizas volantes al cemento en un porcentaje de 15; teniendo como base para esta escogencia los datos de resistencias a la compresión.
- Debido a que el contenido, en los cementos adicionados preparados para este proyecto, de óxido de magnesio y trióxido de azufre es menor a los límites especificados para cada uno de ellos en la norma técnica colombiana NTC 321 (7% y 3,5% respectivamente), se puede afirmar que la interacción de estos óxidos con el agua no producirá reacciones expansivas; negativas para la durabilidad del concreto preparado a partir de cementos adicionados con cenizas volantes.

PERSPECTIVAS Y TRABAJO FUTURO

El trabajo desarrollado en esta tesis deja abierta la puerta a posibles mejoras y complementos del estudio realizado. Como posibles líneas de acción y trabajo futuro se destacan:

- Debido a que el contenido de carbón inquemado en las cenizas volantes es un parámetro importante para determinar su calidad; se recomienda analizar la influencia del nivel de inquemados, en las propiedades físicas y químicas del cemento adicionado con cenizas volantes.
- Realización de una campaña experimental para estudiar la influencia de la finura en las propiedades físicas y químicas del cemento adicionado con cenizas volantes.

- Analizar la influencia de las cenizas volantes en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado.
- Realizar un ensayo industrial en busca de comparar los datos de los análisis de laboratorio, con los del escalamiento industrial.

BIBLIOGRAFÍA

American Society Testing Materials. ASTM C 1437: standard test method for flow of hydraulic cement mortar.

Bhatty, Javed, y otros. Commercial use of high carbon fly ash in cement manufacturing. Construction technology laboratories, inc. 5420 old orchard road, Skokie, Illinois 60077construction technology

Cifuentes, Álvaro y Carlos, Ferrer. Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Tesis de grado en Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2006.

Del Basto, Silvio. Estudio de las propiedades de cementos Portland puzolánicos adicionados con cenizas volantes. Universidad del Valle – Colciencias, 1981.

García, María Paz. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 1993.

Hornaim, H y Otros. Influence of residual carbon in fly ash on microstructures and strength development of mortars and concretes. Proceedings of the Fourth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Turkey, (May. 1992).

INSTITUTO COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA. Estudio para la utilización y/o disposición de residuos sólidos de la combustión del carbón en las centrales térmicas de: Paipa, Tasajero, Zipaquirá y Guajira. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, División de Consultoría Externa. Colciencias. Contrato Icel- Univalle No. 5854.

Martínez, Oscar. Curso de tecnología del cemento. Planta Ramos Arizpe. Cementos Apasco. Cementos Boyacá. 1996.

Matsufuji Y Otros. Study on properties of concrete with ultra fine particles produced from fly ash. Proceedings of the Fourth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Turkey, (May. 1992).

Molina, Omar. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento Portland hidratado. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 2008.

Nielsen, H.C. Preparation of fly cements .F.L. Smidth Et.-Co. A/S Vigerslev Alle 77 Dk-2500 Valby Copenhagen, Denmark.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 33: método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. (Segunda actualización). 1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. NTC 110: método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico. (Segunda actualización).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 117: método de ensayo para determinar el calor de hidratación del cemento hidráulico. (Tercera actualización).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana NTC 118: método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. (Cuarta Actualización).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 121: cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. (Segunda Actualización). 1982.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana NTC 220: determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado. (Cuarta actualización). 1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 221: método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. (Segunda actualización).1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 184: métodos de análisis químicos de los cementos hidráulicos. 2001.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 321: cemento Portland. Especificaciones químicas. (Segunda Actualización). 1982.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 3823: muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales, para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland. 1997

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 3823: cenizas volantes o puzolanas naturales, para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Portland. 1993.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Cementos. NTC 4985: Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del equipo de barrido por aire. 1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.
Norma Técnica Colombiana. Ingeniería Civil y Arquitectura. NTC 111: método para
determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.

Pérez, C. A. Simulación de una cámara de combustión de lecho fluidizado para el
beneficio de cenizas volantes en la fabricación de cemento Portland puzolánico.
Tesis de grado en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Santafé
de Bogotá. 2000.

Salcedo, Antonio. Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e
influencia de los aditivos sobre el mismo. Revista de obras públicas. España.
1986. Págs. 945 a 971.

ANEXOS

Anexo A

Requisitos físico-químicos de las cenizas volantes.

Tabla 13*. Requisitos químicos de las cenizas volantes

Requisitos	Clase de cenizas
------------	------------------

	F	C
Dióxido de Sílice (SiO₂)		
Oxido de aluminio (Al₂O₃)		
Oxido de hierro (Fe₂O₃)		
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (%mín.)	70	50
Trióxido de azufre (SO₃) (%máx)	5	5
Contenido de humedad (% máx)	3	3
Pérdida al fuego (%máx.)	6	6

Tabla 14*. Requisitos físicos de las cenizas volantes

Requisitos	Clase de cenizas	
	F	C
Finura		
- cantidad retenida cuando se realiza un tamizado húmedo con un tamiz #325 (% máx)	34	34
Índice de actividad de resistencia		
- con cemento Portland a los 7 días mínimo porcentaje de control	75	75
- con cemento Portland a los 28 días mínimo porcentaje de control	75	75
- con cal a los 7 días mínimo (Kpa)	5500	-
- agua requerida, máximo porcentaje de control	105	105
Estabilidad		
- contracción o expansión en la autoclave, (% máx.)	0,8	0,8
Requisitos de uniformidad		
- densidad máxima variación respecto al promedio, %	5	5
- retenido en el tamiz #325. Variación máxima puntos de porcentaje con respecto al promedio	5	5

* Fuente: NTC 3493: cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Portland

Anexo B.

Especificaciones físicas y químicas del cemento Portland

Tabla 15. Especificaciones físicas y mecánicas del cemento Portland

REQUISITO	T1	T1M	T2	T3	T4	T5
Finura superficie específica en m²/Kg						
Ensayo por medio de permeabilidad al aire , mínimo	280	280	280	280	280	280
Tiempo de fraguado						
Ensayo por agujas de Vicat						
Tiempo inicial en minutos, no debe ser menor de	45	45	45	45	45	
Tiempo final en horas, no debe ser mayor de	8	8	8	8	8	8
Resistencia a la compresión en MPa						
1D				10		
3D	8	12,5	10,5	21		8,5
7D	15	19,5	17,5		7	15,5
28D	24				17,5	21
Calor de hidratación						
7D máximo Kj/kg			290		250	
28D máximo Kj/kg			330		290	

Fuente NTC 121: Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.

Tabla 16.* Especificaciones químicas del cemento Portland

REQUISITO	T1	T1M	T2	T3	T4	T5
SiO₂ MIN %			21,0			
Al₂O₃ MAX %			6,0			
Fe₂O₃ MAX %			6,0			
MgO MAX %	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
SO₃ MAX %	3,5	3,5		4,5		
P.F. MAX %		5,0	4,0	4,0	3,5	4,0
R. I. MAX%		4,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Fuente NTC 321: Cemento Portland. Especificaciones químicas

Anexo C.

Datos de resistencia a la compresión para cementos adicionados con cenizas volantes

Tabla 17. Datos de resistencia a la compresión para cementos adicionados con cenizas volantes

CONTENIDO DE CENIZA	Muestra de cenizas 1						Muestra de cenizas 2					
	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D
5%	52,5	113,0	19,2	30,0	36,3	43,8	51,9	115,0	18,7	29,6	36,2	42,7
			20,0	29,1	34,9	43,4			19,2	29,6	37,2	45,2
			19,6	30,9	33,7	45,8			18,0	28,6	38,5	43,2
			19,6	30,0	34,9	44,3			18,6	29,3	37,3	43,7
	52,0	111,0	19,3	31,2	38,2	45,2	49,9	114,0	22,8	29,4	37,2	42,3
			21,1	30,0	36,0	44,5			21,7	29,8	35,9	44,1
			19,2	31,8	37,8	45,6			21,7	30,4	36,3	45,8
			19,8	31,0	37,3	45,1			22,0	29,8	36,5	44,1
	52,0	109,0	19,7	26,8	37,4	42,1	49,7	107,0	22,2	25,6	39,2	45,6
			21,2	28,0	35,7	42,1			20,1	30,7	37,6	41,9
			20,2	29,7	33,5	43,6			20,8	30,3	38,7	45,8
			20,4	28,9	35,5	42,6			21,0	30,5	38,5	44,4
Promedio	52,2	111,0	19,9	30,0	35,9	44,0	49,8	112,0	20,6	29,9	37,4	44,1
CoV		1,87	8,9	0,9	1,3	3,4		1,90	3,2	1,7	1,1	3,3
10%	50,3	109,0	21,8	28,5	36,2	46,2	50,0	107,0	19,9	29,3	36,2	44,7
			21,8	30,4	35,0	44,9			19,6	29,0	35,1	45,3
			21,7	28,3	36,1	45,2			21,5	27,4	35,3	42,0
			21,7	29,1	35,7	45,4			20,3	28,6	35,5	44,0
	50,5	108,0	18,9	29,8	35,8	46,6	49,5	105,0	20,9	27,2	37,1	47,0
			19,1	26,9	35,6	46,5			21,0	30,0	35,4	45,8
			19,6	30,8	33,8	46,1			21,5	27,4	35,3	48,2
			19,2	29,2	35,0	46,4			21,1	28,2	35,9	47,0
	50,5	107,0	18,9	29,5	34,2	42,4	51,2	105,0	19,6	28,5	36,7	45,7
			17,8	29,4	36,8	42,5			20,8	30,1	33,9	44,7
			18,3	29,8	36,8	44,3			19,1	28,9	34,8	46,9
			18,3	29,5	35,9	43,4			19,8	29,1	35,1	45,7
Promedio	50,4	108,0	19,8	29,3	35,6	45,1	50,2	105,7	20,4	28,6	35,5	45,6
CoV		1,87	8,9	0,9	1,3	3,4		1,90	3,2	1,7	1,1	3,3

Nota: Coeficiente de variación (CoV)

CONTENIDO DE CENIZA	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D
15%	49,8	108	19,8	28,2	33,6	44,3	49,8	110	18,2	27,3	36,4	46,0
			21,1	27,7	33,1	44,9			17,4	28,6	33,7	46,9
			18,5	26,3	32,8	46,3			18,5	25,9	32,9	45,2
			19,8	27,4	33,2	45,2			18,0	27,3	34,3	46,0
	49,8	108	17,9	26,8	32,3	44,8	49,8	106,5	17,5	25,9	32,6	43,2
			18,0	27,4	33,5	43,9			17,8	28,3	33,4	44,7
			17,8	26,1	31,9	46,2			17,9	26,6	32,4	48,2
			17,9	26,8	32,6	44,9			17,8	27,0	32,8	45,4
	49,8	110	17,7	26,2	34,1	45,2	51,1	105	18,3	27,6	33,0	46,0
			16,9	27,5	32,5	44,0			18,1	27,1	34,3	47,5
			17,4	26,6	34,2	45,3			17,8	27,4	35,5	46,0
			17,3	26,8	33,6	44,8			18,0	27,4	34,3	46,5
Promedio	49,8	108,7	18,3	27,0	33,1	45,0	50,2	107,2	17,9	27,2	33,8	46,0
CoV		1,85	7,1	1,3	1,5	0,4		4,76	0,9	0,8	2,5	1,3
20%	51,0	105,0	16,2	23,3	28,9	42,6	50,2	114,0	16,2	25,3	30,7	42,3
			15,3	22,7	28,4	41,3			16,9	24,4	31,5	44,0
			14,5	23,2	28,3	41,1			16,5	26,4	28,4	42,9
			15,3	23,0	28,5	41,7			16,6	25,4	30,2	43,1
	52,3	108,0	14,1	24,5	30,4	40,8	50,1	115,0	16,0	25,4	31,7	45,2
			14,4	23,3	31,0	41,9			15,7	24,5	31,9	46,6
			13,7	22,4	30,4	40,8			16,9	26,2	32,5	45,0
			14,1	23,4	30,6	41,2			16,2	25,3	32,0	45,6
	52,4	111,0	13,7	21,8	27,3	41,7	49,8	109,0	15,7	23,0	30,5	43,0
			13,7	20,0	28,7	41,2			16,2	23,8	31,6	44,4
			12,9	22,3	29,4	41,8			16,6	24,1	29,6	44,6
			13,4	22,0	29,0	41,6			16,1	23,7	30,5	44,0
Promedio	51,9	108,0	14,3	22,8	29,4	41,5	50,0	112,7	16,3	24,8	30,9	44,2
CoV		5,71	6,8	3,1	3,7	0,6		4,59	1,4	3,9	3,1	2,9

CONTENIDO DE CENIZA	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D	A/C	FLUIDEZ	R1D	R3D	R7D	R28D
30%	53,3	105,0	10,8	18,6	24,9	33,5	50,0	106,0	11,5	19,3	25,6	41,4
			10,7	18,5	24,8	35,3			10,1	19,2	25,6	39,1
			11,6	18,7	24,0	35,9			10,9	20,2	25,7	38,5
			11,0	18,6	24,6	34,9			10,8	19,6	25,6	39,7
	53,0	109,5	9,6	18,7	24,2	36,1	50,7	105,0	11,5	20,6	24,4	38,3
			10,1	19,3	22,9	36,6			11,7	20,7	23,1	39,1
			9,8	18,3	22,3	37,7			9,8	20,7	25,8	41,9
			9,8	18,7	23,6	36,8			11,6	20,7	24,4	39,7
	53,0	115,0	10,5	19,0	22,5	37,6	51,1	105,0	11,3	19,7	26,3	39,6
			10,6	18,9	22,4	33,0			11,4	20,0	25,6	40,4
			11,0	18,7	23,9	34,9			11,7	20,4	26,7	39,9
			10,7	18,9	22,9	35,2			11,4	20,1	26,2	39,9
Promedio	53,1	109,8	10,5	18,7	23,7	35,6	50,6	105,3	11,3	20,1	25,4	39,8
CoV		9,52	5,9	0,7	3,5	2,9		0,95	3,5	2,7	3,5	0,4
40%	53,0	110,0	8,1	14,7	20,0	32,3	52,2	105,0	9,2	16,6	19,4	37,4
			8,4	15,0	19,2	35,1			8,7	15,9	19,8	35,6
			8,2	15,0	19,0	31,8			8,9	15,5	19,8	34,3
			8,2	14,9	19,4	33,1			8,9	16,0	19,7	35,8
	53,0	115,0	7,4	15,6	18,3	32,7	52,5	106,0	8,2	15,6	21,7	34,7
			7,7	14,1	18,5	36,9			8,2	16,3	21,0	34,8
			7,4	14,9	18,7	34,8			8,1	15,8	20,3	36,4
			7,5	14,8	18,5	33,8			8,2	15,9	21,0	35,3
	52,7	106,0	8,1	14,8	18,0	31,2	52	108	7,7	16,3	22,0	34,0
			7,7	14,7	19,4	30,9			7,8	15,7	21,8	35,1
			7,7	14,6	19,3	31,9			7,9	16,2	22,0	34,2
			7,8	14,7	18,9	31,3			7,8	16,1	21,9	34,4
Promedio	52,9	110,3	7,8	14,8	18,9	32,7	52,2	106,3	8,3	16,0	21,4	35,2
CoV		3,77	4,6	0,5	2,4	3,8		2,86	6,8	0,6	3,1	1,9

Fuente: Realización propia

NOTA. Los datos sombreados representan los cubos de los ensayos de resistencia a la compresión cuyos especímenes defectuosos, no fueron tenidos en cuenta para determinar el promedio del ensayo de resistencia, de acuerdo a la NTC 220: determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado.

Anexo D.

Requerimiento de agua y tiempo de fraguado para cemento adicionado con cenizas volantes

Tabla 18. Requerimiento de agua y tiempo de fraguado para cemento adicionado con cenizas volantes

Contenido de ceniza	Muestra de ceniza 1			Muestra de ceniza 2		
	Consistencia Normal	Fraguado Inicial, h	Fraguado. Final, h	Consistencia Normal	Fraguado Inicial, h	Fraguado. Final, h
5%	25,1	1,3	1,9	25,2	1,5	2,3
	25,1	1,4	2	25,3	1,2	1,9
Promedio	25,1	1,3	2	25,3	1,4	2,1
10%	25,7	1,4	2	25,9	1,3	1,8
	25,8	1,5	2,2	25,9	1,3	1,9
Promedio	13	1,4	2,1	25,9	1,3	1,9
15%	26,8	1,4	2	26,3	1,6	2,3
	26,8	1,4	2,3	26,1	1,6	2,4
Promedio	26,8	1,4	2,2	26,2	1,6	2,4
20%	29,2	2,1	3	27,1	1,7	2,3
	29,3	2,1	3	27,2	1,5	2,4
Promedio	29,3	2,1	3	27,2	1,6	2,4
30%	31,4	2,3	4	29,7	2,3	3,3
	31,4	2,3	3,5	29,8	2,3	3,1
Promedio	31,4	2,3	3,8	29,8	2,3	3,2
40%	33,7	2,7	4	32	2,7	4
	33,7	2,7	4,1	32	2,8	4,2
Promedio	33,7	2,7	4	32	2,8	4,1

Fuente: Realización propia

ANEXO E.

Calor de hidratación del cemento adicionado con cenizas volantes

Tabla 19. Calor de hidratación del cemento adicionado con cenizas volantes

Contenido de ceniza	CALOR DE HIDRATACION			
	Muestra de ceniza 1		Muestra de ceniza 2	
	Cemento Hidratado 7D	Cemento Hidratado 28D	Cemento Hidratado 7D	Cemento Hidratado 28D
5%	173,1	197,0	196,1	218,2
	178,6	197,8	189,3	222,8
Promedio	175,9	197,4	192,7	220,5
10%	180,4	186,4	171,3	185,6
	181,7	188,9	187,3	196,3
Promedio	181,0	187,7	179,3	190,9
15%	156,6	185,5	173,4	178,7
	173,5	179,3	169,8	169,4
Promedio	165,0	182,4	171,6	174,1
20%	144,5	166,5	129,4	142,5
	152,8	166,4	139,8	136,8
Promedio	148,7	166,4	134,6	139,6
30%	149,2	161,8	140,1	155,5
	153,2	152,9	156,0	150,5
Promedio	151,2	157,4	148,0	153,0
40%	133,5	137,3	114,6	134,2
	138,4	151,4	130,3	134,1
Promedio	135,9	144,3	122,5	134,1

Fuente: Realización propia

ANEXO F.

Datos de análisis químicos y físicos de cementos adicionados con cenizas volantes

Tabla 20. Datos de análisis químicos y físicos de cementos adicionados con cenizas volantes

Contenido de ceniza	Muestra de ceniza 1										Muestra de ceniza 2									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P.F.	R.I.	BLAINE (m ² /Kg)	DENSIDAD (Kg/m ³)	RM325	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P.F.	R.I.	BLAINE (cm ² /g)	DENSIDAD (g/ml)	RM325
5%	21,73	6,16	4,24	1,13	2,46	2,32	4,73	571,6	3,06	1,56	21,87	6,26	4,26	1,15	2,51	2,23	5,48	5357,8	3,11	1,73
	21,68	6,14	4,24	1,07	2,48	2,33	4,67	558,4	3,09	1,6	21,91	6,21	4,28	1,14	2,51	2,27	5,53	5402,4	3,08	1,73
Promedio	21,71	6,15	4,24	1,1	2,47	2,33	4,7	565,0	3,08	1,58	21,89	6,24	4,27	1,15	2,51	2,25	5,51	5380,1	3,1	1,73
10%	23,59	7,02	4,38	1,12	2,42	2,96	8,59	545,8	2,99	1,6	23,51	7,07	4,41	1,12	2,36	2,8	9,47	5480,1	3,01	1,63
	23,61	7,03	4,37	1,14	2,47	2,91	8,47	536,5	2,97	1,61	23,45	7	4,39	1,11	2,44	2,8	9,54	5522	3,03	1,65
Promedio	23,6	7,03	4,38	1,13	2,45	2,94	8,53	541,1	2,98	1,61	23,48	7,04	4,4	1,12	2,4	2,8	9,51	5501,1	3,02	1,64
15%	25,23	7,69	4,6	1,09	2,34	3,81	12,03	520,8	2,93	1,79	25,41	7,85	4,61	1,07	2,3	3,55	12,35	5530,6	2,96	1,7
	25,15	7,8	4,54	1,09	2,37	3,94	11,96	512,9	2,96	1,89	25,27	7,73	4,53	1,08	2,34	3,56	12,45	5429,1	2,94	1,83
Promedio	25,19	7,75	4,57	1,09	2,36	3,88	11,99	516,9	2,95	1,84	25,34	7,79	4,57	1,08	2,32	3,56	12,4	5479,9	2,95	1,77
20%	27,95	9,17	4,75	1,04	2,19	4,7	18,82	562,3	2,88	1,82	27,1	8,57	4,7	1,04	2,2	4,1	17	5481,6	2,88	1,84
	28,01	9,18	4,85	1,03	2,2	4,68	18,9	563,0	2,88	1,8	27,11	8,51	4,75	1,04	2,2	4,12	16,98	5509,2	2,91	1,9
Promedio	27,98	9,18	4,8	1,03	2,19	4,69	18,86	562,6	2,88	1,81	27,11	8,54	4,73	1,04	2,2	4,11	16,99	5495,4	2,9	1,87
30%	30,6	10,18	4,98	0,95	1,99	5,81	21,78	518,5	2,79	1,51	31,03	10,31	4,91	1,01	2,03	5,37	24,99	5144,3	2,79	1,86
	30,69	10,05	5	0,92	2,08	5,79	21,72	527,6	2,81	1,55	31,04	10,29	4,92	1,00	2,06	5,39	24,91	5250,7	2,78	1,9
Promedio	30,65	10,12	4,99	0,93	2,03	5,8	21,75	523,0	2,8	1,53	31,04	10,3	4,91	1,0	2,05	5,38	24,95	5197,5	2,79	1,88
40%	33,15	11,68	5,19	0,95	1,83	7,33	31,28	533,6	2,7	1,64	34,32	10,8	5,25	0,94	1,88	6,47	32,18	5352,1	2,7	1,85
	33,03	11,65	5,19	0,93	1,9	7,31	31,34	527,6	2,67	1,63	34,22	11,77	5,27	0,94	1,85	6,5	32,22	5264,1	2,67	1,84
Promedio	33,09	11,67	5,19	0,94	1,86	7,32	31,31	530,6	2,69	1,64	34,27	11,29	5,26	0,94	1,86	6,49	32,2	5308,1	2,69	1,85

Fuente: Realización propia

ANEXO G.

Procedimientos de caracterización del cemento adicionado con cenizas volantes

Tabla 21. Procedimientos de caracterización del cemento adicionado con cenizas volantes

TIPO DE PROCEDIMIENTO	TRATAMIENTO											
	1		2		3		4		5		6	
	Ceniza (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Cemento (g)	Ceniza (g)	Cemento (g)
Finura	0,50	9,50	1,00	9,00	1,50	8,50	2,00	8,00	3,00	7,00	4,00	6,00
Tiempo de Fraguado	32,50	617,50	65,00	585,00	97,50	552,50	130,00	520,00	195,00	455,00	260,00	390,00
Resistencia a la Compresión	50,00	950,00	100,00	900,00	150,00	850,00	200,00	800,00	300,00	700,00	400,00	600,00
Calor de Hidratación	7,50	142,50	15,00	135,00	22,50	127,50	30,00	120,00	45,00	105,00	60,00	90,00
Densidad	3,00	57,00	6,00	54,00	9,00	51,00	12,00	48,00	18,00	42,00	24,00	36,00
Óxidos	0,05	0,95	0,10	0,90	0,15	0,85	0,20	0,80	0,30	0,70	0,40	0,60
Perdida al Fuego	0,08	1,43	0,15	1,35	0,23	1,28	0,30	1,20	0,45	1,05	0,60	0,90
Residuo Insoluble	0,05	0,95	0,10	0,90	0,15	0,85	0,20	0,80	0,30	0,70	0,40	0,60
Cloruros	0,15	2,85	0,30	2,70	0,45	2,55	0,60	2,40	0,90	2,10	1,20	1,80
Trióxido de Azufre	0,05	0,95	0,10	0,90	0,15	0,85	0,20	0,80	0,30	0,70	0,40	0,60
Total Materias Primas /Observaciones	375,50	7134,50	751,00	6759,00	1126,50	6383,50	1502,00	6008,00	2253,00	5257,00	3004,00	4506,00
Total Cemento	72096											
Total Ceniza/Muestra	9012											

Fuente: Realización propia

Nota: Cada tratamiento corresponde a un porcentaje de cenizas adicionadas al cemento patrón

ANEXO H.

Clasificación de los cementos

Tabla 22. Clasificación de los cementos

TIPO	APLICACION
<p>1 Normal</p>	<p>Es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados. Se recomienda para construcciones normales en que no se requieren las propiedades especiales de los otros tipos.</p>
<p>1 Mejorado</p>	<p>Se usa en obras de hormigón en general. No se exigen propiedades especiales pero tiene resistencias superiores al Tipo 1</p>
<p>2 Moderado</p>	<p>Se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos (sulfato soluble en el suelo como SO_4: 0.1 – 0.2% o sulfatos en agua: 150 – 1500 ppm), como por ejemplo en las tuberías de drenaje, en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc. Además, de las propiedades que caracteriza al cemento tipo 1, estos cementos presentan menores cambios de volumen, menor tendencia a la exudación, y menor generación de calor de hidratación que el cemento tipo 1. Se caracteriza por su contenido de C_3A menor del 8%. La suma de C_3S y C_2S asegura una adecuada resistencia, tanto en el periodo inicial de fraguado como en edades posteriores.</p>
<p>3 De Rápido Endurecimiento</p>	<p>Desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Este tipo de cemento permite obtener con rapidez elevadas resistencias, usualmente en una semana o menos. A los 28 días, la diferencia de resistencia con el cemento tipo 1, tiende a desaparecer. La alta resistencia inicial puede lograrse por modificaciones en la dosificación de crudos de la composición química, a fin de obtener un porcentaje más alto de C_3S; o por un incremento en la finura del cemento, dado que se obtiene una mayor área superficial, la cual expuesta a la acción del agua dará lugar a una hidratación y endurecimiento más rápidos. Si bien, con resistencia inicial más alta, esta principalmente expuesto a procesos de agrietamiento por contracción por secado. Igualmente, debido a los altos porcentajes de C_3S y C_3A, o al mayor grado de finura, la generación de calor es más alta que en los cementos Tipo 1 Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar moldes o encofrados lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas. También se puede usar en climas fríos, pues, su uso, permite reducir el periodo de curado controlado.</p>
<p>4 De Bajo Calor de Hidratación</p>	<p>Se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo 4 están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas. Sus características principales son: altos porcentajes de C_2S y C_4AF; lenta generación de calor; buena resistencia a la acción de los sulfatos; lento desarrollo de resistencia a la compresión aunque a edades avanzadas alcanza los mismos valores de los otros tipos de cemento; buena resistencia al agrietamiento. Este cemento, es especialmente recomendado para ser usado en circunstancias que requieren grandes masas de concreto, como las grandes presas de gravedad, donde la elevación producida en la temperatura por el calor generado durante el endurecimiento es un factor crítico. Dada su lenta velocidad de hidratación, en general, es inadecuado para la construcción de estructuras normales, dado que requiere un curado de por lo menos 21 días para obtener un adecuado desarrollo de resistencia a la compresión y al interperismo.</p>
<p>5 Resistente a los Sulfatos</p>	<p>Se fabrica para ser empleado en aquellos casos en que se requiera alta resistencia a la acción de los sulfatos (sulfatos en el suelo como SO_4: 0.2 – 2% o sulfato soluble en agua: 1500 – 10000 ppm), la cual se obtiene por un alto contenido de C_3A (menor del 5%). El contenido de silicatos cálcicos hace que este tipo de cemento tenga alta resistencia a compresión, aunque su desarrollo de resistencia aumenta más lentamente que en el cemento tipo 1. El calor generado durante la hidratación no difiere fundamentalmente del de los cementos tipo 4. Por sus características es el cemento que más se aproxima al cemento ideal.</p>

Fuente: <http://www.scribd.com/doc/24863679/Composicion-Quimica-Del-Cemento>

Anexo I.

Variación del análisis químico de los cementos adicionados respecto a la cantidad adicionada de cenizas volantes

Grafico 10. Perdidas al fuego de los cementos adicionados con cenizas volantes

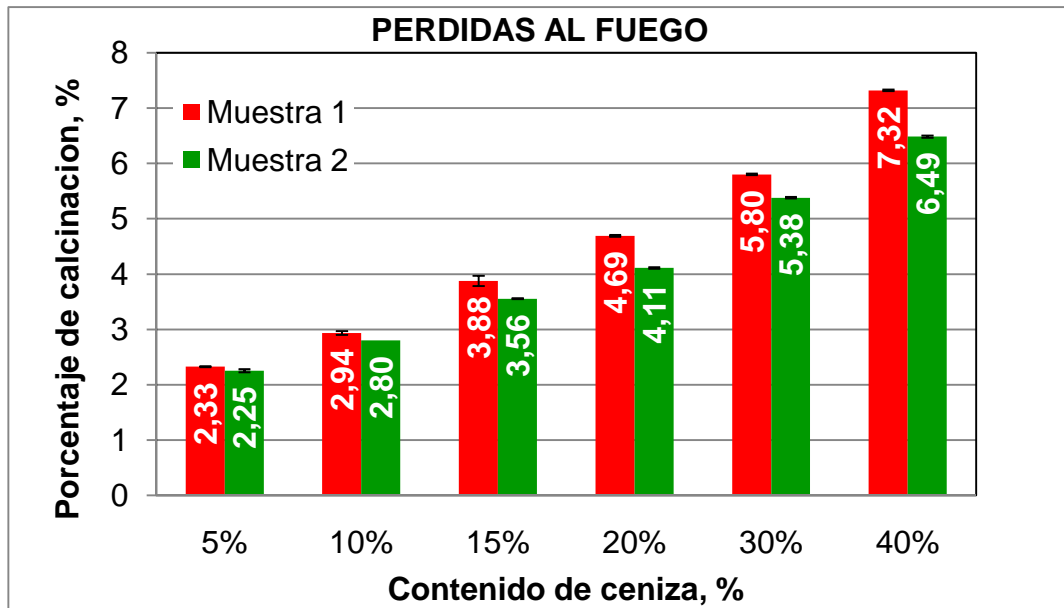


Grafico 11. Residuo insoluble de los cementos adicionados con cenizas volantes

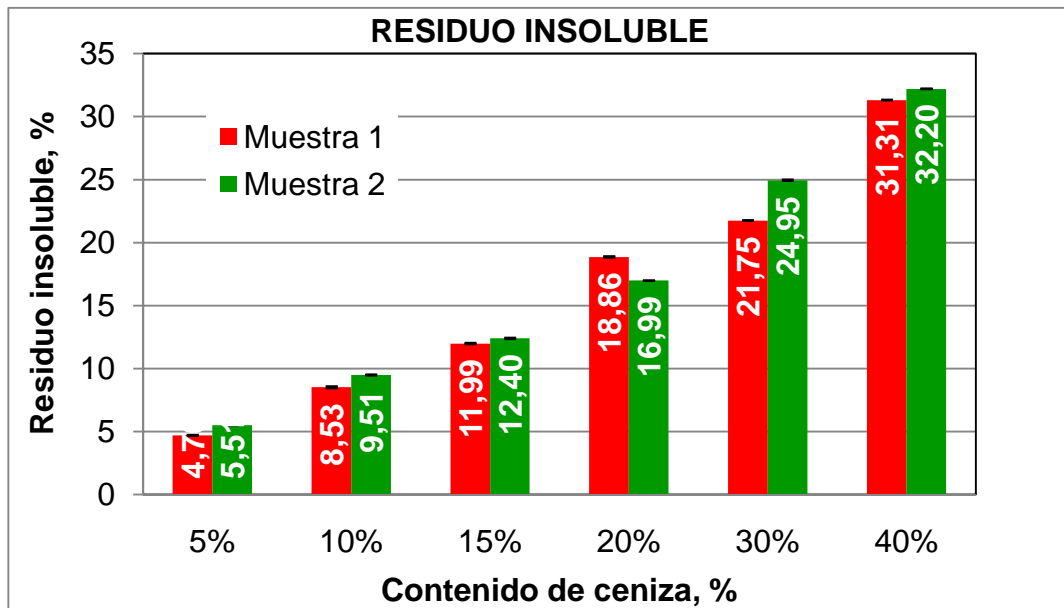


Grafico 12. Oxido de silicio de los cementos adicionados con cenizas volantes

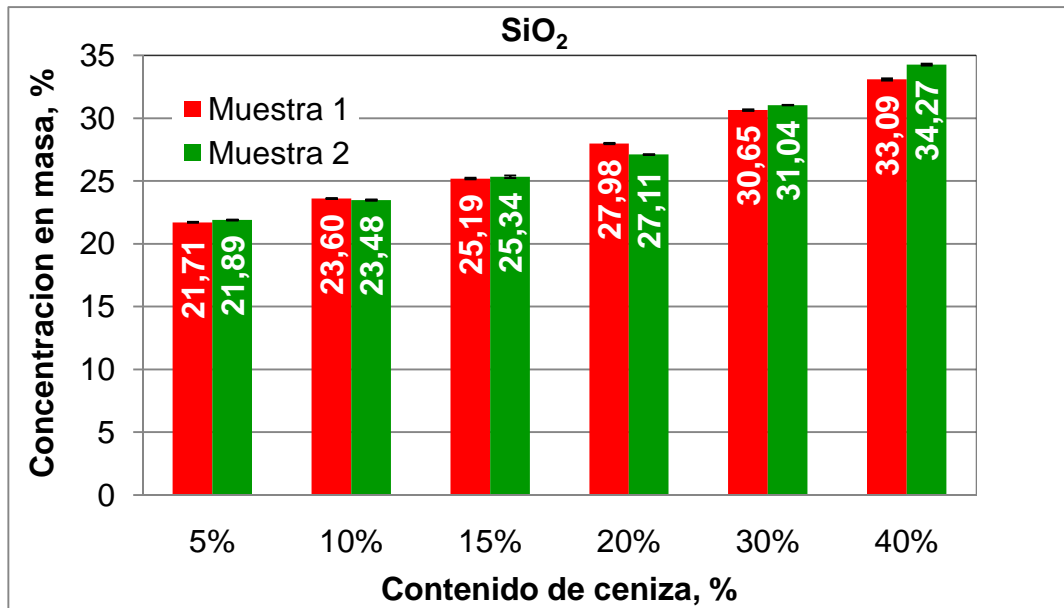


Grafico 13. Oxido de aluminio de los cementos adicionados con cenizas volantes

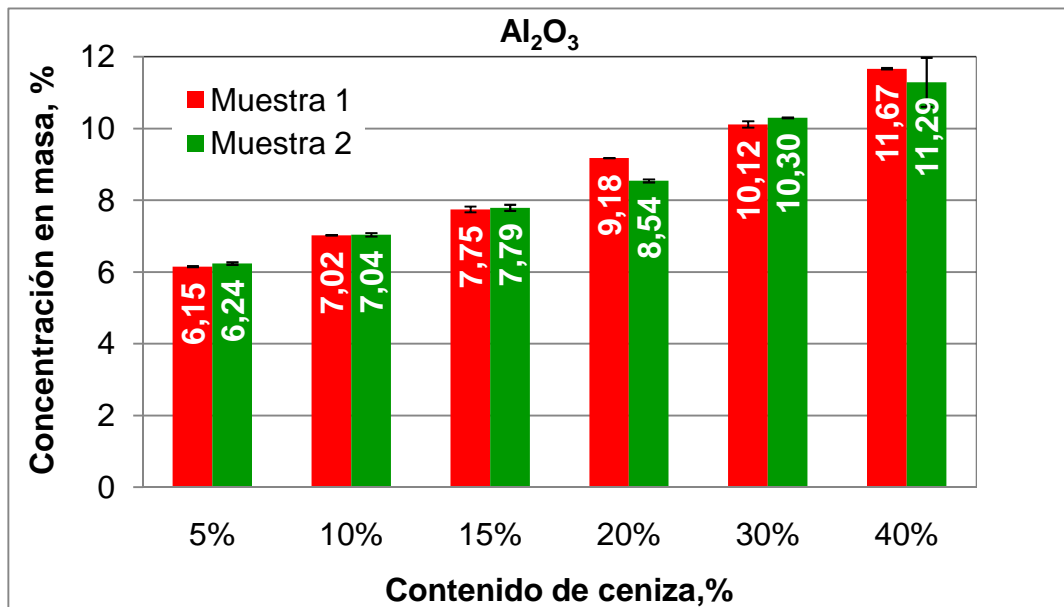


Grafico 14. Oxido de hierro de los cementos adicionados con cenizas volantes

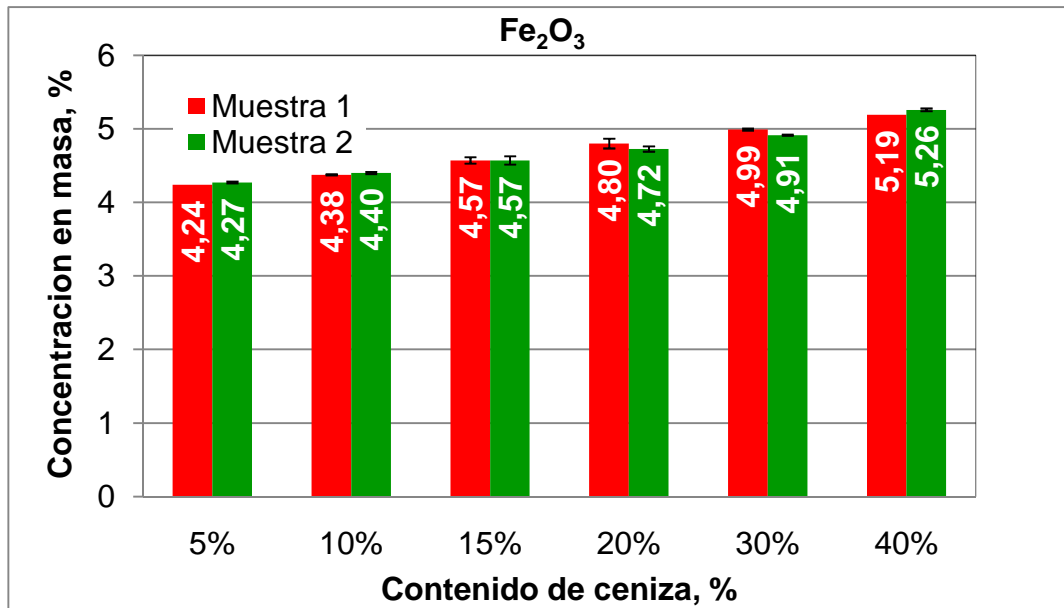


Grafico 15. Oxido de magnesio de los cementos adicionados con cenizas volantes

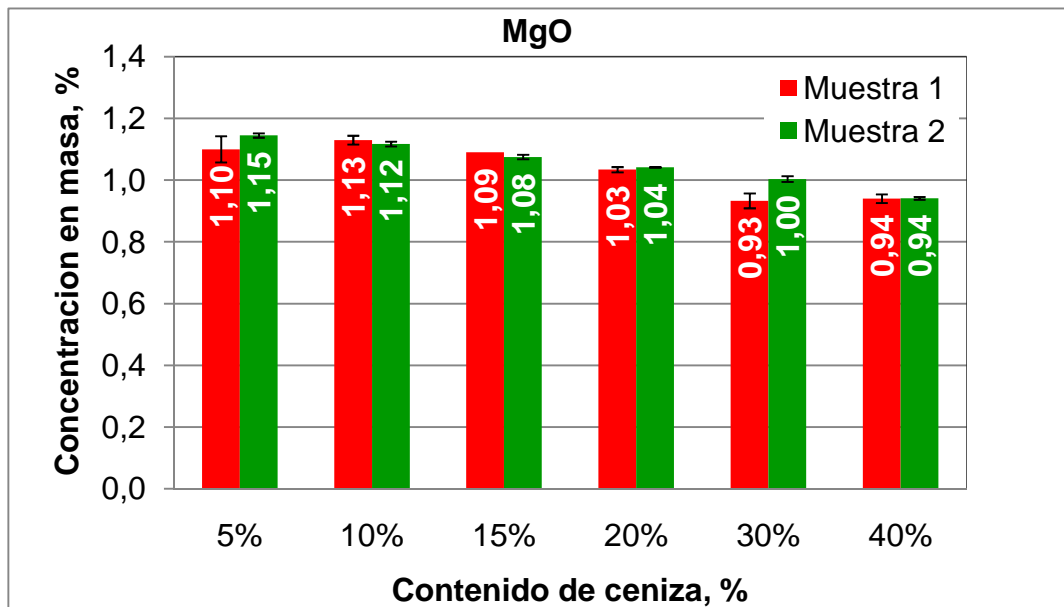


Grafico 16. Oxido de azufre de los cementos adicionados con cenizas volantes

