

**VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO 3000 PSI CON
ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE COMO PORCENTAJE DEL CEMENTO**

JHON JESÚS PÉREZ OLIVELLA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2015

**VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO 3000 PSI CON
ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE COMO PORCENTAJE DEL CEMENTO**

JHON JESÚS PÉREZ OLIVELLA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTORA DEL PROYECTO
PhD. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga. Enero de 2015.

DEDICATORIA

A mi mamá Kira Olivella Orozco, gracias por tu apoyo incondicional que me has dado desde la infancia hasta ahora y porque siempre has trabajado para darme lo mejor, por estar en cada etapa de mi vida por ser una amiga, consejera y comprenderme en los momentos más difíciles, como toda buena madre das la vida por tu hijo. A través de estas líneas quiero decirte lo mucho que te quiero, gracias por ser la mejor mamá del mundo...

Jhon Jesús Pérez Olivella

AGRADECIMIENTOS

A Dios principalmente. Y mi familia y amigos, que siempre están para darme su apoyo cuando más los necesito. A Nayibe Navarro por compartir conmigo tantos momentos llenos de alegría y apoyarme en cada etapa que has estado a mi lado, aportando un granito para que muchos objetivos se conviertan en realidad.

Un especial agradecimiento a mi directora de proyecto, la Doctora María Fernanda Serrano, por su constante apoyo, colaboración, acompañamiento y buen ejemplo, no sólo en la realización de las actividades del proyecto de grado sino también en ayudarme a crecer como persona.

A todas aquellas personas que de una forma u otra, contribuyeron para el desarrollo y culminación de mi trabajo de grado.

Jhon Jesús Pérez Olivella

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Formulación del problema.....	2
1.2	Alcance.....	3
1.3	Justificación.....	4
1.4	Objetivos.....	5
1.4.1	Objetivo General.....	5
1.4.2	Objetivo Específico.....	5
1.5	Relevancia del estudio.....	5
1.6	Organización de la tesis.....	5
2	GENERALIDADES DE LA CENIZA EN LA PRODUCCION DEL CONCRETO.....	6
2.1	Agregados.....	7
2.1.1	Propiedades de los agregados.....	7
2.2	Teoría general del concreto.....	12
2.2.1	Componentes del concreto.....	12
2.2.2	Propiedades del concreto.....	17
2.3	Fly Ash o Ceniza Volante.....	19
2.3.1	Cenizas volantes en el concreto.....	20
2.3.2	Ventajas de cenizas volantes en hormigón.....	21
3	METODOLOGÍA.....	22
3.1	Caracterización de los agregados y la ceniza.....	22
3.1.1	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado (INV E-122-07).....	23
3.1.2	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).....	23
3.1.3	Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07).....	24
3.1.4	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV E-218-07).....	24
3.1.5	Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos (INV E-212-07).....	24
3.1.6	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).....	25
3.1.7	Gravedad específica y absorción de agregados.....	25
3.1.8	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).....	26

3.1.9	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E-305-07).....	27
3.1.10	Densidad del cemento hidráulico (INV E-307-07).	27
3.1.11	Consistencia normal del cemento (INV E-310-07).....	27
3.1.12	Clasificación de la ceniza volante.....	27
3.2	Dosificación de la mezcla del concreto.	28
3.2.1	Selección del asentamiento.	29
3.2.2	Selección del tamaño máximo nominal del agregado.	29
3.2.3	Estimación del contenido de agua.....	30
3.2.4	Determinación de la resistencia de diseño.	30
3.2.5	Selección de la relación agua/cemento.....	31
3.2.6	Calculo del contenido de cemento y adición de la ceniza volante como porcentaje (0, 5, 10 y 15) del peso del cemento.....	31
3.2.7	Estimación del contenido de agregados (finos y gruesos). Por el método del menor porcentaje de vacíos.....	31
3.2.8	Calculo de proporciones iniciales.	32
3.2.9	Ajuste a la mezcla de prueba.....	32
3.3	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).....	33
3.4	Método de prueba estándar para la medición de la velocidad de absorción de agua por concreto de cemento hidráulico (ASTM C1585-13).	34
4	RESULTADOS.....	35
4.1	Caracterización de los agregados.	35
4.1.1	Humedad natural de los agregados (INV E-122-07).....	35
4.1.2	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).....	36
4.1.3	Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07)....	36
4.1.4	Resistencia al desgaste del agregado grueso (INV E-218-07).....	37
4.1.5	Contenido de materia orgánica en arenas (INV E-212-07).....	38
4.1.6	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).....	39
4.1.7	Gravedad específica y absorción de agregados.	39
4.1.8	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).	41
4.1.9	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E-305-07).....	41
4.1.10	Densidad del cemento hidráulico (INV E-307-07).	44
4.1.11	Consistencia normal del cemento (INV E-310-07).....	44
4.1.12	Clasificación de la ceniza volante.....	45

4.2	Dosificación de la mezcla del concreto.....	48
4.2.1	Estimación del contenido de agregados (finos y gruesos). Por el método del menor porcentaje de vacíos.....	49
4.2.2	Ajuste a la mezcla de prueba.....	49
4.3	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).....	49
4.4	Velocidad de absorción de agua por concreto (ASTM C1585-13).....	51
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
5.1	Caracterización de los agregados.....	60
5.1.1	Humedad natural de los agregados (INV E-122-07).....	60
5.1.2	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).....	60
5.1.3	Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07).....	60
5.1.4	Resistencia al desgaste de los agregados (INV E-218-07).....	61
5.1.5	Contenido aproximado de materia orgánica en arenas (INV E-212-07).....	61
5.1.6	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).....	61
5.1.7	Gravedad específica y absorción de agregados.....	63
5.1.8	Peso unitario y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).....	63
5.1.9	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E-305-07).....	64
5.1.10	Consistencia normal del cemento (INV E-310-07).....	67
5.2	Dosificación de la mezcla del concreto.....	67
5.3	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).....	68
5.4	Velocidad de absorción del agua por el concreto (ASTM C1585-13).....	69
6	CONCLUSIONES.....	72
7	RECOMENDACIONES.....	73
8	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	74
	ANEXOS.....	76

LISTA DE ANEXOS

Anexo A, Caracterización de los agregados.	76
Anexo B, Preparación de las mezclas de concreto.....	77
Anexo C, Preparación de los núcleos para la verificación de la permeabilidad.	78
Anexo D, Muestras de verificación de la permeabilidad del concreto.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1, Cemento.....	13
Figura 2, Agregado grueso.....	16
Figura 3, Agregado fino o arena.	16
Figura 4, Ceniza volante.	19
Figura 5, Ceniza ampliada a 400x.....	45
Figura 6, Ceniza ampliada a 1000x.....	45
Figura 7, Ceniza ampliada a 5000x.....	46
Figura 8, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 400x.....	47
Figura 9, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 1000x.....	48
Figura 10, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 5000x.....	48
Figura 11, Curva granulométrica de los agregados gruesos.	61
Figura 12, Curva granulométrica de los agregados finos.....	62
Figura 13, Tiempo de fraguado del cemento con 0% de adición de ceniza volante.	64
Figura 14, Tiempo de fraguado del cemento con 5% de adición de ceniza volante.	65
Figura 15, Tiempo de fraguado del cemento con 10% de adición de ceniza volante.	65
Figura 16, Tiempo de fraguado del cemento con 15% de adición de ceniza volante.	66
Figura 17, Tiempo de fraguado del cemento de las diferentes mezclas.....	66
Figura 18, Consistencia normal del cemento con los diferentes porcentajes de ceniza volante.	67
Figura 19, Resultados grafico del menor porcentaje de vacíos de los agregados.	68
Figura 20, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 0% de ceniza volante.	69
Figura 21, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 5% de ceniza volante.	70
Figura 22, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 10% de ceniza volante.	70
Figura 23, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 15% de ceniza volante.	71
Figura 24, Índice de aplanamiento y alargamiento.	76
Figura 25, colorímetro ASTM C40 con la muestra de arena (Contenido de materia orgánica).	76
Figura 26, Medición del tiempo de fraguado.	76
Figura 27, Mezclas, fundida, desencofrado y falla del de concreto.	77
Figura 28, Comprobación del Asentamiento de la muestra de concreto.....	77
Figura 29, extracción de los núcleos de concreto.	78
Figura 30, Adecuación de los núcleos para verificar la permeabilidad.	78

Figura 31, Absorción de agua para las muestras con 0% de ceniza volante.	79
Figura 32, Absorción de agua para las muestras con 5% de ceniza volante.	79
Figura 33, Absorción de agua para las muestras con 10% de ceniza volante.	80
Figura 34, Absorción de agua para las muestras con 15% de ceniza volante.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1, Tamices de barras	24
Tabla 2, Escala de vidrios de color normalizado.	25
Tabla 3, Asentamiento recomendado para concretos.....	29
Tabla 4, Tamaño máximos de agregados según el tipo de construcción.	30
Tabla 5, Estimación para contenido de agua sin aire incluido.	30
Tabla 6, Proporciones de los agregados finos y gruesos (MUSC _C).....	31
Tabla 7, Valores de C y K para varios cemento tipo I colombianos.....	33
Tabla 8, Resultados de la humedad de los agregados finos y gruesos.....	35
Tabla 9, Resultado del porcentaje de caras fracturadas.	36
Tabla 10, Resultados del índice de aplanamiento.	37
Tabla 11, Resultados del índice de alargamiento.....	37
Tabla 12, Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo y Carga abrasiva.	38
Tabla 13, Resultado a la resistencia al desgaste de los agregados gruesos.	38
Tabla 14, Resultados del contenido de materia orgánica.....	38
Tabla 15, Resultado de la granulometría del agregado grueso.	39
Tabla 16, Resultado de la granulometría del agregado fino.....	39
Tabla 17, Resultados de la gravedad específica y absorción de los agregados finos.....	40
Tabla 18, Resultados de la gravedad específica y absorción de los agregados gruesos.....	40
Tabla 19, Resultado de masa unitaria y porcentaje de vacíos.....	41
Tabla 20, Tiempo de fraguado del cemento con 0% de adición de ceniza volante.	41
Tabla 21, Tiempo de fraguado del cemento con 5% de adición de ceniza volante.	42
Tabla 22, Tiempo de fraguado del cemento con 10% de adición de ceniza volante.	42
Tabla 23, Tiempo de fraguado del cemento con 15% de ceniza volante.	43
Tabla 24, Densidades del cemento con los diferentes porcentajes de ceniza volante.....	44
Tabla 25, Consistencia normal del cemento con los diferentes tipos de adición.....	44
Tabla 26, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 400x.	46
Tabla 26, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 1000x.	46
Tabla 27, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 5000x.	47
Tabla 29, Resultados menor porcentaje de vacíos.	49
Tabla 30, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 0% de ceniza.....	50

Tabla 31, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 5% de ceniza.....	50
Tabla 32, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 10% de ceniza.....	50
Tabla 33, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 15% de ceniza.....	51
Tabla 34, Datos iniciales para el ensayo de absorción del agua por el concreto.	51
Tabla 35, Absorción de la muestra 1 concreto con 0% de ceniza.....	52
Tabla 36, Absorción de la muestra 2 concreto con 0% de ceniza.....	52
Tabla 37, Absorción de la muestra 3 concreto con 0% de ceniza.....	53
Tabla 38, Absorción de la muestra 4 concreto con 0% de ceniza.....	53
Tabla 39, Absorción de la muestra 5 concreto con 5% de ceniza.....	54
Tabla 40, Absorción de la muestra 6 concreto con 5% de ceniza.....	54
Tabla 41, Absorción de la muestra 7 concreto con 5% de ceniza.....	55
Tabla 42, Absorción de la muestra 8 concreto con 5% de ceniza.....	55
Tabla 43, Absorción de la muestra 9 concreto con 10% de ceniza.....	56
Tabla 44, Absorción de la muestra 10 concreto con 10% de ceniza.....	56
Tabla 45, Absorción de la muestra 11 concreto con 10% de ceniza.....	57
Tabla 46, Absorción de la muestra 12 concreto con 10% de ceniza.....	57
Tabla 47, Absorción de la muestra 13 concreto con 15% de ceniza.....	58
Tabla 48, Absorción de la muestra 14 concreto con 15% de ceniza.....	58
Tabla 49, Absorción de la muestra 15 concreto con 15% de ceniza.....	59
Tabla 50, Absorción de la muestra 16 concreto con 15% de ceniza.....	59
Tabla 51, Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad.....	69

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO 3000 PSI CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE COMO PORCENTAJE DEL CEMENTO

AUTOR(ES): JHON JESÚS PÉREZ OLIVELLA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ph.D. Maria Fernanda Serrano Guzman

RESUMEN

Este proyecto se comprobó la permeabilidad con 4 mezclas diferentes del concreto, con la adición de ceniza volante en reemplazo de un porcentaje del cemento en las proporciones de 0%, 5%, 10% y 15%. Demostrando que al implementar la ceniza, proporciona concretos con alto coeficiente de permeabilidad, donde se implementó la norma ASTM C1585-13 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) como referencia para la experimentación, con el propósito de la obtención de la absorción capilar en concretos de resistencias de los 3000 Psi. Donde se tuvo presente los requisitos de resistencia y de permeabilidad que es el factor interno de la durabilidad a la hora de realizar el diseño de mezcla, debido a que la permeabilidad es cualidad que posee el concreto del paso de agua y de vapores de agua, a través de poros y aberturas, deteriorando la estructura. Previendo reparaciones e implementación de recubrimiento impermeable extra sobre la superficie del concreto expuesta, y así garantizar un ciclo de vida útil a la estructura.

PALABRAS CLAVES:

Contenido de ceniza volante, permeabilidad, absorción capilar.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: VERIFICATION OF PERMEABILITY OF CONCRETE 3000 PSI WITH ADDED OF FLY ASH AS A PERCENTAGE OF CEMENT

AUTHOR(S): JHON JESÚS PÉREZ OLIVELLA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ph.D. Maria Fernanda Serrano Guzman

ABSTRACT

This project was checked permeability four different concrete mixtures, with the addition of fly ash replacing a percentage of cement in the proportions of 0%, 5%, 10% and 15%. Proving that implementing ash, concrete provides high permeability coefficient, where the standard was implemented ASTM C1585-13 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) as a reference for experimentation, with the obtaining purpose of capillary absorption in specific resistance of 3000 Psi. Where the requirements of strength and permeability that is internal durability factor when making the mix design, because the permeability is quality concrete having water passage and water vapor was present, through pores and openings, deteriorating structure. Providing extra repair and implementation impermeable coating on the exposed surface of the concrete, and thus to ensure a useful cycle life of the structure.

KEYWORDS:

Fly ash content, permeability, wicking

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han realizado esfuerzos para mejorar la calidad y durabilidad del concreto. Siendo conocido que el uso de cenizas volantes como adición del concreto está ampliamente extendido por dos razones; el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructuras motivados por la adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un concreto más compacto y una reducción del tamaño medio del poro. Sin embargo, la importancia relativa de los cambios de composición y microestructuras en las propiedades mecánicas y la durabilidad en este caso factores internos como la permeabilidad que no están completamente claros. En ese sentido, uno de los principales motivos del proyecto es contribuir a solucionar parte de los problemas en el abastecimiento actual, y aprovechamiento de residuos como la ceniza volante proveniente de localizaciones petrolíferas como adición del cemento para disminuir el impacto ambiental, al mismo tiempo que mejorar la calidad de la mezcla de concreto a nivel nacional.

La amplia variabilidad de usos y aplicaciones del concreto ordinario, lo convierten en un medio global de construcción. Debido a que ha demostrado gran versatilidad comparados con cualquier otro material constructivo, teniendo la ventaja de que se elaboró con materiales disponibles en cualquier localidad normalmente, por lo que se ha implementado el desarrollo de nuevas aplicaciones y tecnologías¹. Por esta razón es implementada la ceniza volante como porcentaje del peso al cemento que es el aglutinante para la formación del concreto.

El empleo de las Ceniza Volante se encuentra beneficioso en la elaboración de concreto debido a que le proporciona resistencia al ataque de aguas sulfatadas, agentes químicos y en particular agua de mar, impidiendo el paso del agua a través de la estructura del concreto que generan problemas en la construcción, como la pérdida del líquido, la cual puede tener un efecto contaminante si se encuentra expuesta a sustancias agresivas conduciendo al deterioro de la estructura. Dado que el cemento debe poseer trabajabilidad y plasticidad, muchos diseños de mezclas necesitan gran cantidad de cemento, el que se requiere para desarrollar adecuadas resistencias, pero una fracción a veces grande de cemento puede ser reemplazada por esta adición de ceniza volante proporcionando economía con su implementación.

¹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero (2001). Bogotá, Colombia: Bhandar. [Citado en 28 de Noviembre de 2014].

1.1 Formulación del problema.

La construcción representa una actividad que demanda alto consumo de materiales, siendo asimismo, una importante generadora de residuos y de contaminación, hechos que han motivado a entidades, industrias, investigadores y demás actores de esta cadena de valor alrededor del mundo a modificar los métodos convencionales de producir y fabricar materiales, diseñar, construir, operar y demoler los proyectos civiles (CAMACOL, 2012), contribuyendo al desarrollo sostenible del que actualmente se promueve en la economía del país.

La gran generación de subproductos industriales es en la actualidad uno de los problemas más inminentes, por lo que su gestión, reciclado y aprovechamiento constituyen el principal reto al país para mitigar el impacto ambiental causado. De acuerdo al más reciente Inventario Nacional de Gases de Efecto invernadero (GEI) realizado por el IDEAM, Colombia produce 44 Millones de toneladas de CO₂ anuales siendo los procesos industriales (5%) con las emisiones que resultan de fabricar cemento².

La ceniza volante, como subproducto, es utilizada para la elaboración de concreto. La ceniza volante puede cumplir tres gestiones diferentes: a) Adición activa incorporada directamente en la mezcladora; b) Adición inerte, es decir, como elemento sustituyente o complementario de las fracciones finas de los áridos, cuando éstos son deficitarios en ella; c) En la preparación de cementos II, II-C, IV y V (Según el pliego RC-93) molida conjuntamente con el Clinker.

Clasificación recogida en la norma ASTM C618:

- Clase F: Cenizas volantes producidas normalmente a partir de la combustión de antracitas y carbones bituminosos y cuya suma de óxidos ácidos es mayor del 70%. Son las cenizas volantes que tienen bajo contenido en cal y presentan propiedades puzolánicas.
- Clase C: Cenizas volante producidas normalmente a partir de la combustión de lignitos y carbones subbituminosos y cuya suma de óxidos ácidos es mayor del 50%. En algunos casos pueden llegar a contener proporciones superiores al 10% de cal libre (CaO). Las cenizas volantes que se consideran en este grupo presentan propiedades cementílicas y puzolánicas, y en caso de utilizarse como cemento, el contenido de cal no puede sobrepasar el 20%.

Además de ésta, hay otras clasificaciones hechas por diferentes autores en las cuales se han manejado distintos criterios, como pueden ser: el tipo de carbón del que proceden, el método de recuperación que se utiliza (mecánico o electrostático) el contenido de carbón sin quemar,

² Revista Semana. Especiales. [En Línea] <<http://www.semana.com/especiales/contaminacion/>> [Citado en 10 de diciembre de 2013]

el contenido de sílice reactiva o de CaO. Entre todas se destaca la que hace referencia a su composición³:

- Silicoaluminosas: se corresponden a la clase F (ASTM C618), de carácter exclusivamente puzolánico. Reaccionan lentamente con la cal y los álcalis.
- Sulfocálcicas: se corresponden con la clase C (ASTM C618), de gran hidraulicidad. Reaccionan formando rápidamente aluminato cálcico hidratado y etringita⁴.
- Silicocálcicas: Corresponden a un nivel intermedio entre las clase F y C, débilmente hidráulicas. Forman etringita, aluminato cálcico hidratado y gehlenita hidratada.

Para dar solución a lo anteriormente mencionado y apreciando las propiedades fisicoquímicas que poseen las cenizas volantes se pretende emplear éstas como adición en 5%, 10% y 15% del peso del cemento en la preparación del concreto, verificando la permeabilidad aunque no existe un método único para la caracterización de macro y microporos del hormigón y relacionarlos con su durabilidad. Sin embargo, diversas investigaciones han indicado que la permeabilidad del hormigón es un parámetro que puede ser utilizado para identificar la durabilidad potencial de un concreto y su comportamiento ante agentes agresivos.⁵

1.2 Alcance.

El propósito del estudio es la evaluación del efecto en la permeabilidad de concretos preparados con ceniza añadida como porcentaje del cemento. La ceniza a utilizar es proveniente de locaciones petroleras. La resistencia de la mezcla de concreto a ensayar será de 3000 psi y los criterios para la evaluación de la permeabilidad serán los contemplados en (Lorenzo García, 1993).

Para la preparación del concreto se empleó el criterio de menor porcentaje de vacíos en la mezcla de agregados en la cuantificación del volumen en las adiciones de 5%, 10% y 15% de ceniza procedente de locaciones petroleras que cumplen la norma NTC 3493 (ASTM C618).

Los ensayos se desarrollaron según la norma ASTM C1585, en núcleos de (100 mm * 50 mm) a edades de curado de 28 días. Con los datos obtenidos, se calcularon los coeficientes de absorción capilar (K), destacando que a mayor porcentaje de ceniza volante existe un

³ SANTAELLA, Luz Elena. Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. [En Línea] <<http://www.umng.edu.co/documents/63968/74796/10art6.pdf>> [Citado en 10 de diciembre de 2013].

⁴ Sal expansiva

⁵ EBENSPERGER, Luis y TORRENT, Roberto. Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. [En Línea] <<http://www.scielo.cl/pdf/ric/v25n3/art03.pdf>> [Citado en 10 de diciembre de 2013].

mayor taponamiento de poros capilares en el material como consecuencia de la mayor densificación (Ahmaruzzaman, 2010).

1.3 Justificación.

El concreto representa la forma más útil de edificación en el actual escenario constructivo. El incremento de su consumo, plantea compromisos de ciencia y tecnología para afrontar los diferentes problemas que se presentan en el abastecimiento de la construcción. El propósito es encontrar soluciones que permitan suplir la mayor parte de las necesidades constructivas de una manera más eficiente.

En ese sentido, uno de los principales motivos del proyecto es contribuir a solucionar parte de los problemas en el abastecimiento actual, y aprovechamiento de residuos como la ceniza volante proveniente de locaciones petrolíferas como adición del cemento para disminuir el impacto ambiental, al mismo tiempo que mejorar la calidad de la mezcla de concreto a nivel nacional. Se aprecia que en el territorio nacional para octubre de 2013, la producción de cemento gris en el país alcanzó las 1.048,6 mil toneladas, lo que representó un incremento de 18,4% con relación al mismo período de 2012. En este mes se despacharon 1.032,8 mil toneladas de cemento gris al mercado nacional, lo que significó un aumento de 13,9%.⁶

Este estudio se buscó el aprovechamiento de la ceniza volante proveniente de las locaciones petrolíferas como porcentaje del cemento y se realizó la verificación de la permeabilidad del concreto. Para ello, se desarrolló un proceso que considera adecuadamente todos los factores que pueden impactar sobre el diseño de mezcla e inclusión de la ceniza como suplemento de un porcentaje del cemento para mejora de la permeabilidad del concreto. Existen estudios sobre tuberías de concreto hechas con cemento que contenían entre 30% y 50% de ceniza volante reemplazando al cemento u que demostraron ser del orden de 5 veces más impermeables que aquellas hechas con cemento sin adiciones⁷, y al tener una baja permeabilidad se obtiene una mayor durabilidad del material durante su periodo de uso a su vez esto resulta en una mayor resistencia a la compresión del material.

⁶Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Comunicado de prensa [En Línea]. <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/cp_cem_gris_oct13.pdf> [Citado en 10 de diciembre de 2013]

⁷GOMEZ, José Gabriel. Permeabilidad. Capítulo 2.6.6. pág. 53 [En Línea] <http://www.maestriaenconstrucciones.com.ec/archivos/JOSE-GABRIEL-GOMEZ_cementos.pdf> [Citado en 10 de diciembre de 2013].

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

- Evaluar el efecto en la permeabilidad del concreto preparado con ceniza añadida como porcentaje general del cemento.

1.4.2 Objetivo Específico.

- Establecer un procedimiento para la prueba de permeabilidad en el concreto.
- Verificar la permeabilidad de una mezcla de concreto preparado con agregados convencionales.
- Verificar la permeabilidad de una mezcla de concreto preparado con agregados convencionales y con ceniza añadida como porcentaje del cemento.

1.5 Relevancia del estudio.

Se pretende destacar la importancia del aprovechamiento de la ceniza volante como adición al cemento, aprovechando estos residuos industriales provenientes de la desorción térmica de lodos provenientes de la perforación de pozos petroleros. Teniendo en cuenta que la disposición final e inadecuado de estos residuos genera impactos desfavorables al medio ambiente se realiza esta investigación cofinanciada con fondos del convenio Ecopetrol-ICP-UPB, donde se presentan alternativas de utilización de la ceniza volante y así mitigar la contaminación tanto de los residuos industriales y la producción del cemento.

1.6 Organización de la tesis.

El trabajo de grado que se presenta a continuación se encuentra organizada la información de la siguiente manera: en capítulo I, se presenta la introducción así como el planteamiento del problema, alcance, justificación, objetivos y relevancia del estudio. En el capítulo II, se encuentra las generalidades de la ceniza volante en la producción del concreto con las respectivas investigaciones que son soporte científico del trabajo realizado. En el capítulo III, se detalla la metodología empleada para la realización de esta investigación. En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos planteados en la metodología, seguido por el capítulo V, donde se realiza el análisis detallado del trabajo del grado, verificación de la permeabilidad del concreto por el método de absorción capilar de la **ASTM C1585-13**. Posteriormente se realizan las propuestas, conclusiones obtenidas a partir del estudio seguido de las recomendaciones. Finalizando con las referencias bibliográficas y la lista de anexos.

GENERALIDADES DE LA CENIZA EN LA PRODUCCION DEL CONCRETO

Durante los últimos años se ha visto incrementado el uso de la ceniza volante en aplicaciones de ingeniería en todo el mundo, con resultados cada vez más satisfactorios. En el ámbito local la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, ha realizado estudios relacionado con la producción de mortero y concreto con ceniza volante como porcentaje del cemento. Entre los trabajos de grados se encuentra “*Evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de locaciones petroleras*” ratificando en este estudio que la proporción de 90% de cemento y 10% de Ceniza Volante resultaban la más recomendada para morteros.

Otra investigación realizada dentro de la institución, evaluó las propiedades mecánicas del concreto simple (3000psi) utilizando ceniza como porcentaje del cemento y concluyeron la conveniencia de adoptar el uso de la ceniza volante como material cementante ya que según los resultados obtenidos en la investigación la resistencia a la compresión se ajustaba a la resistencia obtenida con la mezcla ordinaria. Basados en el problema ambiental actual se recomienda como una muy buena alternativa la implementación de materiales reciclables como material cementante para caso específico la ceniza volante.

En la investigación de la “*Evaluación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de concreto preparado con altos volúmenes de ceniza proveniente de locaciones petroleras*”. Se ve reflejado que los niveles de resistencia observados se deben a que la ceniza volante proveniente de la desorción térmica de lodos provenientes de explotación de hidrocarburos que tienen una composición diferente a la ceniza de extracción de carbón, que presentan buen comportamiento en mezclas de concreto de baja resistencia cuando se utilizan con altos volúmenes de reemplazo del porcentaje del cemento o arena en la producción del concreto.

Concerniente al empleo de la ceniza volante las primeras investigaciones en el ámbito local se realizó en la Universidad Industrial de Santander (UIS), con el estudio del análisis de las cenizas volantes de la central termoeléctrica de Tasajero en la elaboración de concretos ligeros donde determinaron la mezcla óptima del hormigón, con ceniza volante en el reemplazo de los agregados finos.⁸

Entre otro estudio más reciente se encuentra Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto, donde realizaron los geopolímeros a base de ceniza volante, se observa la formación de nuevas fases cristalográficas que no están presentes en la ceniza, estas fases resultan de la disolución de la estructura del aluminosilicatos con la solución

⁸Universidad Industrial de Santander. Catalogo Bibliográfico [En Línea]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=78471%20|11> [Citado en 22 de febrero de 2014].

alcalina. Concluyendo La resistencia mecánica se encuentra relacionada con la concentración de solución alcalina y el porcentaje de sustitución, de esta manera a medida que aumenta la concentración de NaOH en los GC⁹ se incrementa el desempeño mecánico del material.¹⁰

Por consiguiente el empleo de las Ceniza Volante se encuentra beneficioso en la elaboración de concreto debido a que le proporciona resistencia al ataque de aguas sulfatadas, agentes químicos y en particular agua de mar. Además, las investigaciones realizadas por diferentes autores que han hallado diversos usos para la utilización de la ceniza volante demuestran la viabilidad del uso en la fabricación de concreto, concreto presforzado y concretos resistentes a sulfatos, también como estabilizador de suelos y material de relleno, entre otras aplicaciones. Por lo anterior, se comprueba la versatilidad que posee la ceniza volante en obras de ingeniería civil.

2.1 Agregados.

Los agregados constituyen un volumen de (70 a 80 %) lo que es representativo en la producción de concreto. Los agregados son considerados materiales de carácter granular y de origen natural o artificial. Los agregados naturales provienen de las rocas y son obtenidos de la fragmentación natural como la meteorización o intemperismo, e igual manera por el desgaste causado por acción mecánica del agua; es decir, por la abrasión o mediante procesos físico-mecánicos hechos por el hombre. Y, los agregados artificiales se obtienen por los procesos industriales los cuales pueden ser: arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, limadura de hierro y otros. Usualmente este tipo de agregado es más ligero o pesado que los ordinarios o naturales. En ambos casos se conservan las propiedades físicas: densidad, porosidad, textura, resistencia la intemperismo y composición mineralógica de la roca madre.

2.1.1 Propiedades de los agregados.

El estudio de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los agregados representan especial importancia para una adecuada y eficiente utilización en la fabricación del concreto. Esto se refiere a conocer profundamente el origen del agregado para determinar sus cualidades mineralógicas y petrográficas entre otras, para evaluar la calidad del agregado empleado en procesos constructivos.

⁹ Geopolímeros a base de ceniza volante

¹⁰ CASTRO RODRIGUEZ, Diana Catalina. Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto [En Línea] <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/134788.pdf>> [Citado en 24 de febrero de 2014].

2.1.1.1 Propiedades Químicas.

Los agregados conservan la composición mineralógica de la roca que les dio su origen; generalmente son inertes ya que no reaccionan químicamente con los demás constituyentes. Sin embargo desde 1946 se ha venido observando una reacción química de algunos agregados con el cemento cuando se emplean dichos agregados en concretos¹¹.

Los agregados con cierto compuesto químico o mineralógico reaccionan con los álcalis del cemento. Esta reacción se conoce como Álcali-sílice, que comienza cuando los álcalis (óxido de sodio y potasio) en el cemento entran en solución y atacan los silicatos reactivos en los agregados y como resultado se forma alcalescencia¹² al hincharse. Este hinchamiento puede causar expansiones anormales y rompimiento del concreto. Existe una reacción similar llamada Álcali-carbonato pero es menos frecuente que la Álcali-sílice.

La única reacción química favorable de los agregados se conoce como Epitaxia, la cual mejora adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta del cemento, a medida que transcurre el tiempo.

2.1.1.2 Propiedades Físicas.

2.1.1.2.1 Granulometría.

Se describe como la distribución de los tamaños de la partícula que constituyen una masa de agregados. Se representa por medio gráfico para determinar qué tan grueso o fino es el agregado, así como localizar las imperfecciones o excesos de un tamaño en las partículas. Del análisis granulométrico se obtiene los datos, que son los criterios en el diseño de la mezcla de concreto o como factores de calidad, estos son:

- **Tamaño máximo:** Es la apertura del menor tamiz de la serie el cual permite el paso de la totalidad de la muestra. Es decir, lo que indica el tamaño máximo de un agregado es la partícula más grande que hay de la muestra, el cual debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura.
- **Tamaño máximo nominal:** este término se emplea exclusivamente al agregado grueso, es la abertura del tamiz inmediatamente superior o anterior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más. El tamaño máximo nominal determina de mejor manera el tamaño de las partículas más grande de la masa de agregados en su fracción gruesa, por lo cual el tamaño máximo y el máximo nominal

¹¹ Gutiérrez de López, libia. El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional De Colombia. Manizales 2003.

¹² Alteración que experimenta una sustancia al volverse alcalina.

no coinciden. Es decir, indica el tamaño promedio de las partículas del agregado más grandes que hay dentro de una muestra.

- **Módulo de finura:** Es un principio práctico que proporciona que tan fino o grueso es un material. Éste valor puede variar de entre 0 y 10 o más (dependiendo del tamaño máximo presente)¹³, a medida que el valor se acerque a cero indica un agregado fino y en la medida que aumenta su valor indica que el agregado es más grueso. El módulo de finura se ha restringido al agregado fino y según esté las arenas se clasifican en: Arenas finas de 0.5 a 1.5, arenas medias de 1.5 a 2.5 y arenas gruesas de 2.5 a 3.5.
- **Porcentaje de finos:** Es el que pasa el tamiz No. 200 (0.074 mm).

2.1.1.2.2 Formas de las partículas del agregado.

La forma de las partículas de agregado desempeña mucha importancia en la fabricación del concreto, preciso a que la disposición de compactación de la mezcla no solo depende de la granulometría del agregado sino también del grado de acomodamiento las partículas.

- **Redondez:** Son aquellas partículas que poseen las aristas desgastadas por la erosión o el rozamiento del agua.
- **Esfericidad:** La forma de las partículas se indica con dos términos, expresando a su redondez y a su esfericidad. Según la esfericidad las partículas pueden ser esféricas, cúbicas, tetraédricas, laminares y alargadas. Normalmente las gravas y las arenas de ríos son material redondeado, que pueden ser de forma esférica, contrario de los agregados producidos por trituración y los proveniente de suelos residuales que dependen de la naturaleza de la roca y del equipo de extracción.
- **Partículas alargadas:** Son aquellas cuya relación entre la longitud y anchura es mayor de 1.5, este tipo de partículas del agregado grueso deben evitarse porque son desfavorables en el proceso constructivo debido a su forma esta tienden a ubicarse en posición horizontal dentro de la masa compacta del concreto lo que impide la salida de agua en el proceso de curado produciendo burbujas de aire que debilitan la estructura de concreto, estas no debe exceder del 50% de la masa total del agregado.
- **Partículas planas:** Al igual que las partículas alargadas este tipo de partículas en el agregado deben evitarse, en estas partículas la relación entre el espesor y el ancho es menor de 0.5.
- **Textura:** Esta propiedad del agregado corresponde indirectamente de la roca madre, es la textura superficial, y es responsable de la adherencia del agregado y de la fluidez de las mezclas de concreto. Según la textura superficial podemos decir que el

¹³ Sánchez De Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bhandar Editores Ltda. Bogotá 2001.

agregado liso o pulido (material de río) o áspero (material triturado). Esta textura es ligada a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca original.

2.1.1.2.3 Densidad.

Esta propiedad de física de los agregados depende directamente de las propiedades de la roca original de donde provienen, la densidad se define como la relación de peso a volumen de una masa determinada. Pero como las partículas que conforman el agregado están compuesto de minerales y cavidades o poros que pueden estar vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua, dependiendo de su permeabilidad interna. Por lo anterior es necesario conocer los diferentes tipos de densidades.

- Densidad absoluta: Esta se define como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan única y exclusivamente la masa sólida, es decir, que suprime los poros satúrales y no saturables.
- Densidad nominal: Es la relación existente entre el peso de masa y el volumen que ocupan las partículas del agregado incluido los poros no saturables.
- Densidad aparente: Está definida como la relación existente del peso de la masa y el volumen que ocupan el material particular del agregado, incluidos todos los poros, saturables y no saturables. Esta densidad se puede definir en estado húmedo o seco, todo esto dependiendo de la saturación de los poros, debido a esto es la densidad que más interesa en el diseño de mezcla, porque es la que determina la cantidad (en peso) del agregado requerido para el volumen del concreto.
- Porosidad y adsorción: Esta propiedad se relaciona con la capacidad de absorción de agua u otros líquidos dentro del agregado. Capacidad que depende del número y tamaño de poros, permeabilidad y su volumen total.

2.1.1.2.4 Masa unitaria o peso unitario.

El peso volumétrico de un agregado o masa unitaria como es conocido, es la correlación entre el peso de la muestra de agregado compuesto de varias partículas y el volumen que ocupa estas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido. La masa unitaria señala la calidad del agregado y su capacidad para implementarse en la producción del concreto.

- Peso unitario o compactado: El valor de la masa unitaria compactada se utiliza para determinar el volumen absoluto de agregado grueso en las mezclas de concreto. Debido a que esta mejora el acomodamiento y aumenta la masa unitaria cuando el agregado se ha sometido a vibraciones.

- **Peso unitario suelto:** Relación existente entre el peso del agregado suelto y el volumen que ocupa. El peso unitario suelto es menor que el peso unitario compactado porque el material en estado suelto ocupa un volumen mayor.

2.1.1.2.5 Expansión o abultamiento.

El aumento de volumen para un determinado peso de arena, por causa del hinchamiento debido a la presión del agua entre partículas de arena cuando se halla húmeda, es decir con agua superficial. Debido a que cuando la arena se encuentra totalmente saturada de agua no existe expansión alguna.

2.1.1.3 Propiedades Mecánicas.

Las propiedades mecánicas de los agregados, como el peso unitario o volumétrico, solidez, resistencia a la abrasión (resistencia al desgaste) y las características térmicas de los agregados, influyen en la resistencia, endurecimiento y durabilidad del concreto hidráulico. Por consecuencia se debe conocer los factores que intervienen en las diferentes propiedades mecánicas de los agregados, de este modo adquirir la resistencia requerida en el concreto hidráulico y no afectar a su calidad.

2.1.1.3.1 Resistencia.

La resistencia del concreto hidráulico está relacionada directamente con la resistencia de los agregados, estrechamente relacionado con la estructura de la partícula de cada agregado, o con el proceso de trituración y explotación; algunos procedimientos inadecuados inducen a fallas en la estructura de las partículas.

2.1.1.3.2 Tenacidad.

La tenacidad es la resistencia que brinda el agregado al impacto, estas cargas de impactos son las generadas por el transporte y disposición de los agregados que alteran su granulometría. Esta resistencia depende del tipo de roca y su grado de cementación y consolidación, al ser baja la tenacidad varía la calidad del concreto.

2.1.1.3.3 Adherencia.

La adherencia es de las propiedades más importantes en la producción del concreto hidráulico porque la resistencia y durabilidad del concreto están ligadas a la fuerza físico-química producida del aglutinamiento del agregado con el material cementante, al ser esta interacción óptima sabiendo que la adherencia del agregado depende de la forma, textura y tamaño de las partículas, la resistencia del concreto es mayor.

2.1.1.3.4 Dureza.

La dureza es la resistencia que aporta el agregado a la acción del roce y al desgaste rutinario. La dureza de los agregados depende de su constitución mineralógica, procedencia y estructura de los agregados. Teniendo en cuenta que el concreto empleado en obras civiles puede estar sometido al desgaste por abrasión (losas y carreteras), los agregados empleados en su fabricación deben ser duros.

2.2 Teoría general del concreto

El concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado a nivel mundial, en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener gracias a que se puede moldear y por sus propiedades para ser usado como elemento estructural y no estructural; además por su economía, razones que hacen de este, un material de mejor calidad frente a construcciones de madera, mampostería o acero. A continuación establecerán el fundamento y las características del concreto.

2.2.1 Componentes del concreto.

El concreto se fabrica mezclando homogéneamente: cemento, agua, arena y grava. A seguir se especifica cada función de los componentes dentro de la mezcla de concreto, cualidades y características para la obtención del concreto de óptimo desempeño.

2.2.1.1 Cemento.

El cemento Portland es el material de construcción de mayor empleo ver la Figura 1, producto obtenido al pulverizar el Clinker¹⁴ con adición de yeso, considerando que es un material aglomerante cuando es mezclada con agua u otra sustancia (Agregados pétreos), forma una pasta blanda que se endurece en contacto con el aire, que tiene propiedades de adherencia y cohesión, lo que permite la unión de fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad.

Figura 1, Cemento.



Fuente: Autor

2.2.1.1.1 Propiedades físicas y mecánicas del cemento portland.

Tanto las propiedades físicas y mecánicas del cemento portland se realizan directamente al cemento en su estado puro, en el mortero o en la pasta y estos reflejan la calidad que presenta el cemento mostrando los aspectos como material cementante. Entre estas propiedades están:

- **Peso específico (densidad):** La densidad o peso específico del cemento es la relación de una masa dada y el volumen absoluto que ocupa la masa. La densidad del cemento varía muy poco y presenta un valor de 3.10 a 3.15 g/cm³ para el cemento portland Tipo I empleado frecuentemente, cuando el valor de la densidad es menor indica que el cemento posee adiciones debido a que el contenido en el Clinker es menor por toneladas de cemento su valor puede estar comprendido entre 3.00 y 3.10 g/cm³, dependiendo esto del porcentaje de adiciones que tenga el cemento. Esta propiedad

¹⁴ Clinker resulta de la calcinación hasta una fusión incipiente de una mezcla dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos.

del cemento no indica la calidad del cemento, pero este es empleada para el diseño de la mezcla y su debido control en el la producción del concreto.

- Superficie específica (finura): La finura del cemento está ligada directamente al valor hidráulico del cemento, por esto es considerada una propiedad física muy importante. Debido a que la hidratación de los granos de cemento ocurre del exterior hacia el interior, su finura tiene gran influencia en la velocidad de hidratación, en el desarrollo de calor, en la retracción y en el aumento de resistencia con la edad. Todo esto indica que el cemento cuando es muy fino, se endurece rápidamente desarrollando altas resistencias a menor tiempo provocando la liberación de mayor calor lo que produce la retracción y por ende más vulnerable a la fisuración, contrario al cemento con granos gruesos que produce reacciones lentas como la hidratación del cemento que conlleva a endurecer con una menor rapidez, lo que puede producir exudación de agua por no poder retenerla debido al tamaño de sus granos generando un bajo rendimiento del cemento.
- Fraguado del cemento: El fraguado es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento, esta pasta se produce al mezclar cemento con agua en la cual la pasta es trabajable y moldeable, el tiempo transcurrido desde el momento que se agrega el agua hasta que pierde la viscosidad y eleva su temperatura se denomina fraguado inicial lo que indica que la pasta está semisólida y parcialmente hidratada, consecutivamente la pasta sigue endureciéndose hasta no deformarse por cargas relativamente pequeñas, toma rigidez y llega al máximo de temperatura, el tiempo que transcurre desde el momento que se le agrega agua al cemento hasta el estado descrito es denominado fraguado final. A donde empieza el proceso de endurecimiento de la pasta, es decir al aumento de resistencia mecánica de la pasta.
- Resistencia mecánica: La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad que posee la mayor influencia en fines estructurales. Debido a que es la que determina las especificaciones del cemento.

2.2.1.1.2 Clasificación de los cementos Portland.

La clasificación de los cementos Portland se debe a su composición química y sus propiedades físico-mecánicas, lo que genera diferentes tipos de cemento debido a la hidratación producida por cada uno de ellos.

La clasificación utilizada en Colombia se encuentra en la norma NTC 30, basados en las normas ASTM, se da las siguientes clasificaciones y nomenclaturas:

- Cemento Portland tipo 1. Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- Cemento Portland tipo 1-M. Alcanza resistencias superiores a las del tipo I.

- Cemento Portland tipo 2. Es resistente a la acción moderada de sulfatos y el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales
- Cemento Portland tipo 3. Alcanza alta resistencia inicial.
- Cemento Portland tipo 4. El desprendimiento de calor es bajo.
- Cemento Portland tipo 5. Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- Cemento Portland Blanco. Se elabora con materiales debidamente seleccionados que no contienen óxido de hierro, por eso la coloración. Se usa para decoración.

También conforman los 1A, 1MA, 2A y 3A que corresponden a los ya indicados con adición de material incorporador de aire. Estas características mencionadas para cada tipo de cemento se obtienen variando las proporciones de los diferentes compuestos en el Clinker a partir de la dosificación de la materia prima del cemento (Silicato tricálcico, Silicato dicálcico, Aluminato tricálcico, Ferroaluminato tetracálcico, Yeso natural y Oxido menores de Ca, Mg, Na, K, Mn, Tl, P, Fe).

2.2.1.2 Agua.

El agua es el componente indispensable en el la producción del concreto, debido que es el que permite la reacción química con el cemento para que desarrolle su capacidad ligantes, aparte de brindar propiedades de fraguar y endurecer para formar un sólido con los agregados, por esta razón existe dos clasificaciones del agua en la fabricación del concreto las cuales son:

- Agua de Mezclado: Es la cantidad de agua necesaria para producir una pasta eficientemente hidratada, con fluidez que permita la lubricación de los agregados cuando se encuentren en estado plástico la mezcla, es decir el agua que le proporciona la manejabilidad de la mezcla.
- Agua de Curado: Es el agua empleada para hidratar eficientemente el cemento en forma sólida otorgándole así al concreto llegue a resistencia deseada, todo esto ocurre después del fraguado donde se endurece la mezcla de concreto.

2.2.1.3 Agregados.

Los agregados ocupan del (70 a 80 %) del volumen del concreto, debido a esto las características del concreto dependen de las propiedades de los agregados. Donde estudiaron a profundidad en el **Ítem 2.1**.

2.2.1.3.1 Agregado grueso.

El agregado grueso (Figura 2) es un componente primordial que le brinda resistencia al concreto, por consiguiente se debe usar la mayor cantidad posible y de gran tamaño, teniendo en cuenta las condiciones para la colocación y resistencia.

Figura 2, Agregado grueso.



Fuente: Autor.

2.2.1.3.2 Agregado fino.

El agregado fino (Figura 3) en la mezcla de concreto se considera llenante, además de actuar como especie de lubricante en el agregado grueso proporcionando manejabilidad a la mezcla de concreto.

Figura 3, Agregado fino o arena.



Fuente: Autor.

2.2.2 Propiedades del concreto.

El concreto posee diversas propiedades las cuales se presentan en el estado fresco, y son las que determinan la calidad y características del concreto en su estado endurecido. Mencionando a continuación las más importantes.

2.2.2.1 Manejabilidad.

Es la propiedad del concreto que determina su capacidad para ser colocado, consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación ni exudación. La manejabilidad o trabajabilidad está relacionado con la plasticidad porque posee la propiedad de moldearse y cambiar lentamente si se extrae del molde.

En la manejabilidad, el principal factor influyente es el contenido de agua, por tanto, se debe evitar que ocurra la segregación, porque las partículas gruesas tienden a separarse por acción de la gravedad, producidas generalmente por las mezclas secas y poco plásticas e igualmente la separación de la pasta (cemento y agua), que se ocasiona con las mezclas muy fluidas. Así mismo, prevenir la exudación que es generada con el agua del mezclado cuando sube a la superficie del concreto durante el fraguado. Generando problemas en la resistencia al desgaste y fisuras por la contracción, presentes de dos formas diferentes, relacionados con la velocidad de evaporación cuando esta es menor que la velocidad de exudación, creándose una capa de agua en la superficie del concreto que aumenta la relación agua-cemento, produciendo porosidad y baja resistencia al desgaste y, cuando la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de exudación se pueden crear fisuras de contracción.

2.2.2.2 Resistencia.

El concreto como material estructural se diseña para que tenga una determinada resistencia. La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica más importante de un concreto y se utiliza normalmente para determinar su calidad. También el concreto se diseña para que resista esfuerzos de flexión que se observa en pavimentos rígidos y otras losas que se construyen sobre el terreno estableciendo una correlación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Existiendo factores que afectan la resistencia del concreto se pueden dividir en dos. Los primeros tienen que ver con la calidad y cantidad de elementos constitutivos del concreto: agregados, cemento y agua y los segundos a la calidad del proceso del concreto: mezclado, transporte, colocación, compactación y curado; la resistencia está en relación directa con este proceso.

2.2.2.3 Durabilidad.

La durabilidad en el concreto, es la propiedad que le hace mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio a través del tiempo y frente a problemas de clima, ataques químicos o cualquier otro proceso de deterioro por causas físicas, químicas o mecánicas. También es afectada por causas internas, como su permeabilidad, los materiales constituyentes o cambios de volumen debido a diferentes propiedades térmicas.

Las condiciones ambientales son las más influyentes en el deterioro y están relacionadas con el aire, agua, suelos, gases, congelación, ciclos repetidos de humedecimiento y secado, sustancias disueltas en el agua o sustancias dañinas en contacto directo, y las características de los materiales utilizados en la fabricación (cemento, agua, agregados). Por otra parte hay causas internas como se mencionó anteriormente y el grado de permeabilidad del concreto que depende de varios factores como la porosidad de la pasta de cemento, la porosidad de los agregados, distribución de los poros presentes en el interior del concreto, la relación agua-cemento y la eficiencia en la compactación del concreto para eliminar las burbujas de aire atrapado tanto como el tiempo de curado y del proceso seguido en la mezcla y su posterior colocación.

2.2.2.4 Resistencia al fuego.

El concreto tiene propiedades de resistencia al fuego, es decir el concreto puede tener un comportamiento satisfactorio y sin emitir gases durante un tiempo relativamente alto. Un aspecto importante desde el punto de vista del fuego es que el cemento Portland sometido a temperaturas presenta un coeficiente de dilatación negativo a medida que se calienta; luego al enfriarse sigue contrayéndose debido a la deshidratación, lo que explica por qué las estructuras después de un incendio presentan una apariencia normal mientras están calientes, pero al enfriarse pierden la cohesión. Contrario de los agregados que no presentan mayor dilatación hasta los 500 y 600 °C.

Cuando el concreto que protege el refuerzo de un elemento estructural queda expuesto a la acción del fuego, éste introduce altos gradientes de temperatura y las capas superficiales calientes tienden a separarse y descascararse desde la parte interior donde la masa está más fría. Es decir que el comportamiento del concreto reforzado frente al fuego es directamente proporcional al espesor del recubrimiento del acero de refuerzo¹⁵.

¹⁵ Gutiérrez de López, libia. El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional De Colombia. Manizales 2003.

2.2.2.5 Cambios volumétricos.

Entre los cambios volumétricos del concreto producidos al endurecerse la pasta (cemento, agua y agregados) se encuentran; el asentamiento plástico ocurrido después del vaciado del concreto los agregados gruesos tiende a asentarse por efecto de la gravedad hasta que el concreto se endurece, pero si hay acero u otro obstáculo que impida el libre acomodamiento de la mezcla, se provocan asentamientos diferenciales que ocasionan grietas. Otro cambio es la contracción plástica que se presenta en las superficies horizontales mientras el concreto está aún fresco y por lo general generan grietas que aparecen brevemente después de que el brillo del agua desaparece de la superficie del concreto. Y por último el cambio volumétrico en estado endurecido, el concreto cambia de un estado fluido al de masa rígida pasando por el estado plástico, después del fraguado final se inicia el proceso de endurecimiento, produciendo cambios de volumen.

2.3 Fly Ash o Ceniza Volante

Las cenizas volantes (Figura 4) en el concreto en lugar de una parte de cemento, no sólo reducir los costos sino también mejorar la trabajabilidad del concreto y mejorar la resistencia a prueba de agua, el aire, el rendimiento y la resistencia al ataque químico de rendimiento sulfato y menor calor de hidratación, mayor resistencia de la temperatura concretas para reducir la separación de partículas y análisis del fenómeno de agua, reducir la contracción y agrietamiento del hormigón, y la inhibición de la corrosión ambiental actual en el acero de refuerzo en el concreto por efectos de la permeabilidad.

Figura 4, Ceniza volante.



Fuente: Autor.

Con el fin de obtener la necesaria trabajabilidad y plasticidad, muchos diseños de mezclas necesitan gran cantidad de cemento, el que se requiere para desarrollar adecuadas resistencias, pero una fracción a veces grande de cemento puede ser reemplazada por esta adición de ceniza volante.

2.3.1 Cenizas volantes en el concreto.

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de carbón pulverizado en las plantas de generación de energía eléctrica. Cuando el carbón pulverizado se enciende en la cámara de combustión, el carbón y los materiales volátiles se queman. Sin embargo, algunas de las impurezas minerales de arcilla, esquisto, feldespatos, etc., están fusionados en suspensión y se llevaron a cabo de la cámara de combustión en los gases de escape. A medida que los gases de escape fresco, los materiales fundidos se solidifican en partículas vítreas esféricas llamadas cenizas volantes. El tamaño de las partículas de ceniza volante varía, pero tiende a ser similar a ligeramente más grande que la de tipo I Cemento Portland. Las cenizas volantes se obtienen de los gases de escape mediante precipitadores electrostáticos o filtros de mangas. Composición química de la ceniza volante es principalmente de vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Color generalmente varía de gris oscuro a canela amarillento de cenizas volantes utilizados para el hormigón.

ASTM C 618 Especificación para cenizas volantes de carbón y crudo o calcinada puzolana natural para uso como adición mineral en concreto tiene dos designaciones para las cenizas volantes utilizadas en hormigón.

- Clase F cenizas volantes normalmente se produce por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas y tendrá un dióxido de sílice mínimo más óxido de hierro óxido de aluminio, más del 70%.
- Cenizas de Clase C normalmente se produce a partir de carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables. Esta clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes y tendrá un dióxido de sílice mínimo más óxido de aluminio más contenido de óxido de hierro de 50%.

La mayoría de las especificaciones estatales y federales permiten, e incluso estimulan, el uso de las cenizas volantes; especialmente, cuando se necesitan los requisitos de durabilidad específicos. Además de éstas, existen otras clasificaciones hechas por diferentes autores en las cuales se han manejado distintos criterios.

2.3.2 Ventajas de cenizas volantes en hormigón.

La ceniza volante es una puzolana lo que indica que es un material silíceo o aluminio siliceous que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland para formar hidrato de silicato de calcio adicional y otros compuestos cementosos . Las reacciones de hidratación son similares a las reacciones que se producen durante la hidratación del cemento Portland. Por lo tanto, el concreto que contiene cenizas volantes puzolana se vuelve más denso, más fuerte y generalmente más duradera a largo plazo en comparación con las mezclas de concreto de cemento Portland convencionales.

Cenizas volantes mejora la trabajabilidad del concreto y reduce la demanda de agua. Partículas de cenizas volantes son diminutas cuentas de vidrio principalmente esféricas. Materiales terrestres, como el cemento Portland son partículas sólidas angulares. Partículas de cenizas volantes proporcionan una mayor facilidad de trabajo de la porción de polvo de la mezcla de hormigón que se traduce en una mayor facilidad de trabajo del concreto, y una disminución de la necesidad de agua para la misma consistencia normal del concreto. El uso de cenizas volantes puede reducir en gran medida la acumulación de calor, el agrietamiento externo y la permeabilidad de concreto.

Cabe resaltar que los costos de las cenizas volantes es generalmente menor que el cemento Portland en función de transporte. Cantidades importantes pueden ser sustituidas por el cemento Portland en mezclas de concreto y sin embargo aumentar la fuerza y la durabilidad a largo plazo. Por lo tanto, el uso de las cenizas volantes puede impartir beneficios considerables a la mezcla de concreto.

METODOLOGÍA

Los ensayos de este proyecto se realizaron bajo los conceptos establecidos por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec), los cuales se referencian bajo los procedimientos de la American Society for Testing Materials (ASTM) y parámetros estipulados en las normas American Concrete Institute (ACI), Norma Técnica Colombiana (NTC), las Normas del Instituto Nacional de Vías (INV) y las notas técnicas del Instituto Colombiano de Productores de Concreto (ICPC) para la elaboración de mezclas de concreto, caracterización de los agregados y ensayos de permeabilidad.

3.1 Caracterización de los agregados y la ceniza.

El material granular empleado para la caracterización está conformado por la ceniza volante proveniente de la desorción térmica¹⁶ de los lodos durante la explotación de crudo y por agregados gruesos y finos obtenidos de la región.

A estos materiales se les sacó una muestra representativa de cada uno de los bultos, teniendo en cuenta el peso necesario para todos los ensayos buscando de esta forma la mayor homogeneidad posible en los resultados de cada prueba.

Los agregados fueron sometidos a ensayos de humedad natural, caras fracturadas, índice de aplanamiento y de alargamiento, resistencia al desgaste, contenido de materia orgánica, granulometría, densidad específica, masa unitaria suelta y compacta, consistencia y densidad del cemento dado que para el desarrollo de la mezcla de concreto es esencial cada ensayo mencionado. A la ceniza se le realizó la Microscopía Electrónica de Barrido¹⁷ este ensayo agrupa un conjunto de técnicas que permiten la caracterización morfológica, estructural y de composición de superficies sólidas mediante imágenes con diferente grado de resolución a partir de su interacción con un haz de electrones enfocado sobre la muestra.

¹⁶ La desorción térmica elimina las sustancias químicas dañinas del suelo y otros materiales, como lodo y sedimentos, utilizando calor para transformar dichas sustancias químicas en gases. Esos gases se recolectan empleando un equipo especial. El polvo y las sustancias químicas dañinas se separan de los gases y se eliminan con seguridad y el suelo limpio se regresa al sitio. La desorción térmica no es igual a la incineración, que se emplea para destruir las sustancias químicas.

¹⁷ Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.1.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado (INV E-122-07).

La aplicación práctica de la determinación del contenido de agua en un material, es conocer la masa del agua removida al secar dicho material cuando está húmedo (espécimen de prueba) hasta peso constante, en un horno controlado a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$); y usar este valor como la masa del agua en el espécimen de prueba. La masa del material remanente después de secado en el horno, corresponde a la masa de las partículas sólidas. El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_C} * 100 = \frac{W_w}{W_S} * 100$$

Donde:

$w =$ Contenido de agua (%).

$W_1 =$ Masa del recipiente y del espécimen húmedo (g).

$W_2 =$ Masa del recipiente y del espécimen seco (g).

$W_C =$ Masa del recipiente (g).

$W_w =$ Masa del agua (g).

$W_S =$ Masa de las partículas sólidas (g).

3.1.2 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).

Algunas especificaciones contienen requisitos relacionados a un porcentaje de partículas fracturadas en agregados gruesos. Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento. Este método proporciona un procedimiento estandarizado para determinar la aceptabilidad de los agregados gruesos con respecto a esos requisitos.

$$P = \left[\left(F + \frac{Q}{2} \right) / (F + Q + N) \right] * 100$$

Donde:

$P =$ Porcentaje de partículas con el número específico de caras fracturadas.

$F =$ Masa o número de partículas fracturadas con al menos el número de caras fracturadas especificado.

$Q =$ Masa o número de partículas en la categoría de cuestionable o frontera.

$N =$ Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas o que no cumplen el criterio de partículas fracturadas.

3.1.3 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07).

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones d_i/D_i , tal como se indica en la Tabla 1. Cada una de las fracciones granulométricas d_i/D_i se tamiza a continuación empleando para ello barras paralelas y separadas a $3/5[(d_i+D_i)/2]$, las partículas que pasen son consideradas planas.

El ensayo de índice de alargamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones, es decir las cantidades retenidas en los tamices $3/4''$, $1/2''$, $3/8''$, y $1/4''$. Siguiendo lo establecido en la norma INVIAS, cada fracción se analiza utilizando el calibrador de alargamiento, para separar las partículas largas y posteriormente determinar la masa de las partículas que no pasaron por la abertura.

Tabla 1, Tamices de barras

Fracción granulométrica d_i/D_i (mm)	Anchura de la ranura del tamiz de barras (mm)
50/63	33.9 ± 0.3
37.5/50	26.3 ± 0.2
25/37.5	18.8 ± 0.2
19/25	13.2 ± 0.2
12.5/19	9.5 ± 0.1
9.5/12.5	6.6 ± 0.1
6.3/9.5	4.7 ± 0.1

3.1.4 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm ($1\frac{1}{2}''$) por medio de la máquina de los ángeles (INV E-218-07).

Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura. Los límites de las especificaciones deben ser asignados con extrema precaución, considerando los tipos de agregados disponibles y su comportamiento histórico en aplicaciones finales específicas.

3.1.5 Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos (INV E-212-07).

La importancia de este método de ensayo está en el hecho de proporcionar una advertencia sobre las impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el material. Cuando una muestra

sujeta a este ensayo produce un color más oscuro que el color estándar, tal como se indica en la Tabla 2, es aconsejable ejecutar la prueba para determinar el efecto de las impurezas orgánicas sobre la resistencia del mortero (norma ASTM C87 / C87M-10)¹⁸.

Tabla 2, Escala de vidrios de color normalizado.

Color Estándar Gardner No.	Placa Orgánica No.
5	1
8	2
11	3 (Estándar)
14	4
16	5

3.1.6 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).

Este método se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos que serán utilizados como agregados. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables y para suministrar los datos necesarios para la mezcla que contengan agregados. Las operaciones de tamizado se realizaron según las normas INV E-213-07 en la cual se describe el tamaño de muestra a ensayar y los consecutivos procesos para el desarrollo del análisis granulométrico.

3.1.7 Gravedad específica y absorción de agregados

3.1.7.1 Gravedad específica y absorción de agregados finos (INV E-222-07).

Mediante una muestra preparada según indica la norma INVIAS. Posterior del periodo de inmersión en agua de la muestra como se indica en la norma correspondiente se realiza una decantación para esparcir la muestra en una superficie no absorbente en donde se seca superficialmente hasta introducir la muestra en el cono manteniendo está parcialmente estable, inmediatamente ocurra esto se procede a verter dentro de un picnómetro con agua 500 gramos de agregado fino saturado y superficialmente seco hasta alcanzar el 90% de su capacidad, seguido se sacar el aire atrapado con una bomba de aire generando un vacío o girando el picnómetro, tomando nota de las lecturas para realizar los cálculos.

¹⁸ Este método de ensayo cubre la determinación del efecto sobre la resistencia del mortero de las impurezas orgánicas en agregado fino. Se realizó una comparación entre resistencias a la compresión de morteros hechos con agregado fino lavada y sin lavar.

3.1.7.2 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV E-223-07).

Este ensayo se emplea para determinar las gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente. Este ensayo tiene como finalidad aplicativa a los agregados gruesos, determinando la absorción luego de que la muestra representativa ha sido lavada, secada y posteriormente sumergida en agua durante un periodo de 15 a 19 horas y luego, es secada superficialmente con un paño absorbente.

3.1.8 Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).

Este método de prueba se emplea a menudo para determinar valores de densidad bulk, que son utilizadas por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto.

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

M = Densidad bulk del agregado

G = Masa del agregado mas la del recipiente de medida

T = Masa del recipiente de medida

V = Volumen del recipiente de medida

La densidad bulk puede también ser usada para determinar la relación entre masa/volumen para conversiones en acuerdos de compra. Además, los agregados en las unidades transportadoras y en las pilas de acopio generalmente contienen humedad absorbida o de superficie (esta última afecta el abultamiento), en cambio este método de prueba determina la densidad bulk basada en condiciones en seco.

$$M_{SSS} = M + \left[1 + \frac{A}{100} \right]$$

Donde:

M = Densidad bulk de los agregados en condiciones SSS.

A = % de absorción, determinada según las normas INV E - 222 - 07 (agregados finos) o INV E - 223 - 07 (agregados gruesos).

Los vacíos en los agregados se pueden calcular en la siguiente forma, empleando la densidad bulk obtenida mediante apisonado, vibrado o simplemente mediante el llenado a paladas.

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{S * W - M}{S * W} * 100$$

Donde:

S = Gravedad específica bulk determinada según las normas INV E – 222 – 07 (agregados finos) o INV E – 223 – 07 (agregados gruesos).

M = Densidad bulk de los agregados

W = densidad del agua (998 kg/m³).

3.1.9 Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E–305–07).

Para la realización de este ensayo se basa en los parámetros establecidos en la norma INVIAS correspondiente que indica la preparación de una pasta de 500 gramos de cemento mezclado con agua, cuya cantidad de agua se determina realizando el ensayo de consistencia normal del cemento. Después de obtener la pasta se moldea y enraza, tomando lecturas cada 15 minutos hasta que la aguja del vicat tenga penetraciones de 25 mm e inferiores a este valor.

3.1.10 Densidad del cemento hidráulico (INV E–307–07).

Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto, en la determinación de la densidad se debe emplear kerosene libre de agua, o nafta con una densidad mayor que 0.7391ml a 23° ± 2° C. La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen líquido desplazado por el peso de cemento usado en el ensayo. La densidad debe calcularse como sigue:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de cemento (g)}}{\text{Volumen desplazado (cm}^3\text{)}}$$

3.1.11 Consistencia normal del cemento (INV E–310–07).

Este ensayo tiene por objeto establecer la consistencia normal del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. Este consiste en mezclar 650 gramos de cemento con una cantidad de agua conocida, se llena el molde y se enrasa, se ubica el vástago del aparato de Vicat en el centro de la pasta tocando su superficie inmediatamente dejando caer el vástago hasta que penetre la pasta. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando el vástago penetra 10±1mm bajo la superficie 30 segundos después de haber sido soltado.

3.1.12 Clasificación de la ceniza volante.

La clasificación de la ceniza se realizó con un microscopio electrónico de barrido que funciona con un haz de electrones producido por una fuente de electrones que puede ser un

cañón termoiónico (filamento de tungsteno o de hexaboruro de lantano) o un cañón de emisión de campo FEG¹⁹. Los electrones chocan e interactúan con la muestra produciendo varias señales que son recogidas por los detectores; La amplificación de la imagen se produce por un conjunto de lentes electromagnéticas que mediante un tratamiento adecuado de las señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos (Andes, 2014).

3.2 Dosificación de la mezcla del concreto.

La dosificación de una mezcla de concreto es la determinación de la combinación más económica y practica de los componentes del concreto para que éste sea “trabajable” en su estado plástico y para que adquiera las propiedades requeridas en su estado sólido²⁰. Para identificar la dosificación apta para una resistencia de 3000 Psi, con la adición de ceniza volante como porcentaje del cemento, fue indispensable la preparación de mezclas testigos, calculadas con los principios básicos preestablecido en las normas del ICPC, las cuales están basadas en parámetros estipulados en las normas American Concrete Institute (ACI). Asimismo apoyándose en el concepto de menor porcentaje de vacíos de los agregados²¹. La particularidades de la mezclas testigos indican los respectivos ajustes a realizar en la dosificación. Para lograr las proporciones de la mezcla del concreto que cumplan las características deseadas, con los materiales, se elabora en el método de “ensayo y error” que en este caso coincide con un sistema de ajuste y reajuste, teniendo como base las proporciones iniciales que se determinan siguiendo los procedimientos siguientes:

- a. Selección del asentamiento.
- b. Selección del tamaño máximo nominal del agregado.
- c. Estimación del contenido de agua.
- d. Determinación de la resistencia de diseño.
- e. Selección de la relación agua/cemento.
- f. Calculo del contenido de cemento y adición de la ceniza volante como porcentaje (0, 5, 10 y 15) del peso del cemento.
- g. Estimación del contenido de agregados (finos y gruesos). Por el método del menor porcentaje de vacíos.
- h. Calculo de proporciones iniciales.
- i. Primera mezcla testigo (prueba).
- j. Ajuste a la mezcla de prueba.

¹⁹ Field Emission Gun

²⁰ ICPC, Instituto colombiano de productores de cemento. Método práctico para dosificar mezclas de concreto. Medellín (Colombia). 2ed. 1982.

²¹ Método de la Road Note Laboratory (RNL). Estimación del volumen de agregados, se utiliza cuando los agregados no cumplen con las recomendaciones granulométricas NTC 174 (Especificaciones de los agregados para concreto).

3.2.1 Selección del asentamiento.

El asentamiento requerido se selecciona teniendo en cuenta las especificaciones de la obra; él que se toman siguiendo los parámetros contemplados en la Tabla 3, es decir, la consistencia requerida de la mezcla, el tipo de estructura y las condiciones de colocación del concreto y la manejabilidad de la mezcla de concreto.

Tabla 3, Asentamiento recomendado para concretos.

ASENTAMIENTO RECOMENDADOS PARA CONCRETOS DE DIFERENTES GRADOS DE MANEJABILIDAD		
CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (cm)	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
Muy Seca	0 – 2.0	Pilotes o vigas prefabricadas de alta resistencia, con vibradores de formaleta.
Seca	2.0 – 3.5	Pavimentos con maquina terminadora vibratoria.
Semi-Seca	3.5 – 5.0	Pavimentos con vibradores normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masa voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
Media	5.0 – 10.0	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, con mediana compactación, columnas, vigas, fundaciones y muros reforzados, con vibración.
Húmeda	10.0 – 15.0	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Normalmente no es apropiado para compactarlo con demasiada vibración.

3.2.2 Selección del tamaño máximo nominal del agregado.

El tamaño máximo nominal del agregado disponible se obtuvo mediante los resultados de la granulometría de agregados gruesos. Para estos se recomiendan que estén dentro de los parámetros estipulados en la Tabla 4²².

²² ICPC, Instituto colombiano de productores de cemento. Método práctico para dosificar mezclas de concreto. Medellín (Colombia). 2ed. 1982.

Tabla 4, Tamaño máximos de agregados según el tipo de construcción.

TAMAÑOS MÁXIMOS DE AGREGADOS SEGÚN EL TIPO DE CONSTRUCCIÓN				
Dimensión mínima de la selección (Cm)	TAMAÑO MÁXIMO EN PULGADAS (mm)			
	Muros reforzados, vigas y columnas.	Muros sin refuerzos	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzos o poco reforzadas
6 – 15	½” (12) – ¾” (19)	¾” (19)	¾” (19) – 1” (25)	¾” (19) – 1½” (38)
19 – 29	¾” (19) – 1½” (38)	1½” (38)	1½” (38)	1½” (38) – 3” (76)
30 – 75	1½” (38) – 3” (76)	3” (76)	½” (38) – 3” (76)	3” (76)
75 o mas	1½” (38) – 3” (76)	6” (152)	1½” (38) – 3” (76)	3” (76) – 6” (152)

3.2.3 Estimación del contenido de agua.

Se estima la cantidad de agua, según la Tabla 5, con el asentamiento escogido y de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado, teniendo en cuenta que el concreto es sin aire incluido.

Tabla 5, Estimación para contenido de agua sin aire incluido.

AGUA EN KILOGRAMOS POR METRO CUBICO DE CONCRETO PARA LOS TAMAÑOS MÁXIMOS DE AGREGADOS INDICADOS							
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
ASENTAMIENTO (cm)	10 mm.	13 mm.	20 mm.	25 mm.	40 mm.	50 mm.	75 mm.
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire, (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

3.2.4 Determinación de la resistencia de diseño.

El cálculo de resistencia de dosificación se realiza de acuerdo a lo expresado en la investigación, es decir, una resistencia mínima de diseño de 3000 Psi (210 kg/cm²) a los 28 días. Con adición de ceniza volante como porcentaje del cemento, para cumplir con lo estipulado.

3.2.5 Selección de la relación agua/cemento.

La relación agua/cemento (A/C) requerida, es determinada con los requisitos de resistencia y también teniendo en cuenta la durabilidad. Debido a que la utilización de distintos cementos, agregados y agua producen generalmente diferentes resistencias con la misma relación agua/cemento. Para el diseño de mezcla al trabajar con un menor valor de la relación agua/cemento, se garantiza la resistencia como la durabilidad del concreto. Proporcionando la prolongación de la vida útil así como la reducción en la penetración de líquidos.

3.2.6 Cálculo del contenido de cemento y adición de la ceniza volante como porcentaje (0, 5, 10 y 15) del peso del cemento.

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones hechas en la estimación del contenido de agua (Ítem 3.2.3) y en la determinación de la resistencia de diseño (Ítem 3.2.4); el contenido de cemento es igual al contenido estimado de agua en la mezcla, dividido por la relación (A/C).

$$\text{Contenido de cemento } C = \frac{A}{A/C}$$

3.2.7 Estimación del contenido de agregados (finos y gruesos). Por el método del menor porcentaje de vacíos.

Para la realización de este ensayo se debe considerar los métodos para la determinación de masa unitaria seca compacta y compuesta (MUSC_C) de las diferentes proporciones de los agregados (finos y gruesos), tomados del Ítem 3.1.7 (Gravedad Específica Aparente G_{sa} 23°/23°C) para los dos tipos de agregados. De acuerdo a las siguientes Tabla 6 de proporciones se procederá a definir MUSC_C con las diferentes relaciones.

Tabla 6, Proporciones de los agregados finos y gruesos (MUSC_C)

Mezclas	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2
Arena	20	30	40	50	60	70	80
Grava	80	70	60	50	40	30	20

Al determinar las diferentes proporciones, se prosigue con el cálculo del peso específico compuesto (PE_C) por medio de la ecuación:

$$PE_C = \frac{(\%G * PE_T) + (\%A * PE_A)}{100\%}$$

Donde:

$\%G$ = Porcentaje de agregado grueso (Grava)

PE_T = Peso específico del agregado grueso

$\%A$ = Porcentaje de agregado fino (Arena)

PE_A = Peso específico del agregado fino.

Al poseer la masa unitaria seca compacta y compuesta ($MUSC_C$) de cada una de las mezclas de agregados y el peso específico compuesto (PE_C) se procede con determinar el menor porcentaje de vacíos con la siguiente ecuación.

$$\%Vacíos = \frac{PE_C - MUSC_C}{PE_C}$$

De los resultados obtenidos del porcentaje de vacíos se procede a graficar cada uno de estos versus las diferentes proporciones de las mezclas.

3.2.8 Cálculo de proporciones iniciales.

Este cálculo es utilizado para expresar las proporciones de la mezcla de concreto, indica la relación por peso de cemento, agregado fino y grueso, siendo la unidad el cemento. Al realizar la mezcla se debe tenerse en cuenta la humedad de los agregados para pesarlos correctamente. Generalmente, los agregados están húmedos y a su peso seco debe sumarse el peso del agua que contienen, tanto absorbida como superficial. El agua que va a agregarse a la mezcla debe reducirse o aumentarse en una cantidad igual a la humedad libre de los agregados, esto es, la humedad natural menos la absorción. Para poder hacer esto, es necesario realizar los ensayos estipulados en el **Ítem 3.1.1** (humedad natural de los agregados) antes de hacer la mezcla de prueba.

3.2.9 Ajuste a la mezcla de prueba.

Las proporciones calculadas de la mezcla deben verificarse por medio de ensayos de asentamiento y resistencia, realizadas de las muestras tomadas de la mezcla de prueba en el laboratorio o en el campo; cuando no se cumple con el asentamiento o resistencia requerida, debe hacerse los ajustes necesarios. Tanto por asentamiento que al preparar la primera mezcla de prueba, usando la cantidad de agua calculada, no se obtiene el asentamiento requerido es necesario ajustar la mezcla calculando el agua necesaria para lograrlo, y luego calcular los contenidos de arena, grava y cemento ajustados. Seguido de los ajuste por resistencia obteniendo el asentamiento, se elabora la mezcla de prueba necesaria para hacer seis

cilindros, 3 para ensayar a los siete días y 3 a los 28 días. La elaboración de 3 cilindros para cada período determinado satisface a que el resultado de un sólo cilindro no es confiable.

Aunque es preferible esperar los 28 días para saber si la mezcla de prueba cumple con la resistencia requerida, asimismo se es posible extrapolar la resistencia a los siete días, para conocer la resistencia aproximada de los 28 días, empleando por medios practico al trabajo de grado la fórmula de (Sánchez De Guzmán, 2001) par.

$$R_{28} = C + KR_7$$

Donde:

R_{28} = Resistencia a la compresión a los 28 días de edad en kg/cm^2 .

R_7 = Resistencia a la compresión a los 7 días de edad en kg/cm^2 .

C, K = Costantes que dependen del tipo de cemento. en la tabla 7 aparecen estos valores.

Tabla 7, Valores de C y K para varios cemento tipo I colombianos.

Cemento	C	K
Argos	36,34	1,36
Boyacá	39,7	1,4
Cairo	32,49	1,31
Caldas	26,51	1,43
Caribe	31,48	1,29
Diamante B/manga	-15,75	1,59
Diamante Cúcuta	17,83	1,38
Diamante Tolima	45,28	1,35
Nare	6,03	1,5
Paz del Rio	59,38	1,28
Samper Sta. Rosa	10,35	1,44
Samper Siberia	41,23	1,34
Valle	29,22	1,5

3.3 Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).

Los resultados de este ensayo se pueden usar como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto; para el cumplimiento de especificaciones y como control para evaluar la efectividad de aditivos y otros usos similares. Teniendo cuidado en la interpretación del significado de las determinaciones de la resistencia a la compresión mediante este método de ensayo, por cuanto la resistencia no es una propiedad intrínseca fundamental del concreto elaborado con determinados materiales. Los valores obtenidos dependen del tamaño y forma del espécimen, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, moldes y fabricación, así como de la edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado.

3.4 Método de prueba estándar para la medición de la velocidad de absorción de agua por concreto de cemento hidráulico (ASTM C1585–13)²³.

La absorción de agua de una superficie de hormigón depende de muchos factores, incluyendo: las proporciones de la mezcla de hormigón; la presencia de aditivos químicos y adiciones al cemento materiales; la composición y características físicas del componente de cemento y de los agregados; el contenido de aire atrapado; el tipo y la duración de curado; el grado de hidratación o la edad y método de colocación incluyendo consolidación y acabado. La absorción de agua es también fuertemente afectada por la condición de humedad del hormigón en el momento de la prueba. Debido a esto se establece como método de prueba el estipulado en la **ASTM C1585–13**.

La experimentación se realizó posterior a los 28 días de curado del concreto, donde se secaron los cilindros por 3 días consecutivos hasta la extracción de los núcleos, que fueron llevados al horno para prevenir cualquier contacto de humedad, después de este secado se emparafinar las paredes de los núcleos dejando una cara descubierta y la otra tapada con un plástico transparente. Que permite el flujo capilar en los núcleos experimentales. Realizando medidas iniciales de su masa y posteriores a los 0, 5, 15, 30, 60, 210, 240, 270 y 300 minutos, seguidas de tomas cada 24 horas del tiempo inicial por 6 días. Registrando en cada medida el peso de la muestra para realizar los cálculos correspondientes a la infiltración del agua, por el cual se determinara la permeabilidad, es decir, el método para determinar la absorción capilar consiste en registra la ganancia de masa de una muestra constituida por núcleos de concretos sometidos al contacto con agua por una de sus caras, empleando la siguiendo ecuación para el correspondiente calculo.

$$I = \frac{m_t}{a * d}$$

Donde:

I = La absorción.

m_t = Cambio en la masa de las muestra (g) , en el los diferentes tiempos.

a = el área expuesta de la muestra (mm²).

d = la densidad del agua en (g/mm³).

Resaltando que en el proceso de absorción capilar, el líquido que se encuentra en contacto con el concreto no saturado, y que penetra en él por absorción capilar, lo hace con mayor velocidad a medida que el diámetro de los capilares sea mayor. Por lo tanto, para que un concreto sea impermeable la red capilar debe ser muy fina, pero por otra parte, entre más fina sea la red capilar mayor es la absorción del concreto (NTC 4483).

²³ ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.

RESULTADOS

En este capítulo se describen los aspectos abordados a lo largo de la investigación y se evidencia que los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos permitió la caracterización de los agregados a utilizar en la elaboración de mezclas para cilindros de concreto con adición de ceniza volante como porcentaje del cemento, la verificación de los aspectos relacionados con la resistencia y capacidad mecánica del concreto y la incidencia de la ceniza en la permeabilidad de las mezclas modificadas.

4.1 Caracterización de los agregados.

La caracterización de los agregados influye en el comportamiento del concreto recién mezclado y endurecido. Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso)²⁴, a medida que se conozcan sus propiedades como gradación o granulometría, absorción, resistencia y módulo de elasticidad, tamaño máximo, gravedad específica, resistencia al ataque de sulfatos y dureza. Es más confiable la realización de un diseño de mezcla de concreto para que cumpla los requisitos de trabajabilidad y resistencia establecidos en el proyecto.

4.1.1 Humedad natural de los agregados (INV E-122-07).

La prueba permite determinar el contenido de agua de un material, se emplea para establecer una similitud de su consistencia, o el comportamiento del agregado y otras propiedades. El ensayo se realizó con la norma INV E-122-07 que consiste en secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua, con relación a la masa de los sólidos. Los resultados se reflejan en la Tabla 8.

Tabla 8, Resultados de la humedad de los agregados finos y gruesos

Humedad Natural			
Agregado	Peso del Agua (g)	Peso Seco (g)	W %
Fino (Arena)	41.8	1075	3.89 %
Grueso (Grava)	12.8	1117.2	1.15 %

²⁴ ARQHYS. Construcción. [En Línea] <<http://www.arqhys.com/agregado-concreto.html>> [Citado en 21 de diciembre de 2014]

4.1.2 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).

Este ensayo se realizó según lo que se estipula en la norma INVIAS correspondiente, con el propósito de observar que porcentaje de agregados cumplen con la maximización de la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas del agregado grueso, asumiendo lo anterior brinda estabilidad, fricción y textura a los agregados utilizados. En la Tabla 9, muestra los datos y resultados obtenidos en el laboratorio fue un 87.64 % de caras fracturadas en la muestra total.

Tabla 9, Resultado del porcentaje de caras fracturadas.

Caras Fracturadas					
Tamiz		Muestra (g)			Porcentaje de caras fracturadas (%)
Pasa	Retenido	Dudosas	Caras Fracturadas	Caras Lisas	
		Q	F	N	P
1½"	1"	0	45.8	68.2	40.18 %
1"	¾"	0	1286.8	189.2	87.18 %
¾"	½"	0	2416.2	291.8	89.22 %
½"	3/8"	0	862.4	145.2	85.59 %
3/8"	¼"	0	831.6	73.4	91.89 %
Total		0	5442.8	767.8	87.64 %
(Q) Masa o número de partículas en la categoría cuestionable o frontera.					
(F) Masa o número de partículas fracturadas con al menos el número de caras fracturadas especificado.					
(N) Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas o que no cumplen el criterio de partículas fracturadas.					
(P) Porcentaje de partículas con el número específico de caras fracturadas.					

4.1.3 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07).

Por medio del ensayo se verifica la calidad de los agregados, debido a que es necesario garantizar la capacidad de acomodamiento de las partículas por lo que estas brindan una alta densidad y por tanto una mayor resistencia en el concreto. Los resultados obtenidos se pueden valorar en las Tabla 10, para el índice de aplanamiento, y en la Tabla 11, para el índice de alargamiento, los cuales cumplen con los requisitos que se estipulan en la norma NTC 174 (ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO) que declara que el porcentaje de partículas indeseables (plana o alargada) no debe exceder el 50% de la masa total del agregado.

Tabla 10, Resultados del índice de aplanamiento.

ÍNDICE DE APLANAMIENTO			
Fracción Granulométrica	Masa Total de la Fracción (R ₁)	Masa de las partículas que pasan por el calibrador (m ₁)	Índice de Aplanamiento I _{Ai}
1''	114.0	23.8	20.88
¾''	1476.0	413.6	28.02
½''	2708.0	469.8	17.35
3/8''	1007.6	198.8	19.73
¼''	905.0	139.8	15.45
M ₁ =ΣR ₁ =	6210.6	1245.8	=M ₂ =Σm ₁
Índice Global de Aplanamiento (I_A)			20.06

Tabla 11, Resultados del índice de alargamiento.

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO			
Fracción Granulométrica	Masa Total de la Fracción (R ₁)	Masa de las partículas que pasan por el calibrador (m ₁)	Índice de Alargamiento I _{Li}
1''	114.0	0.0	0.00
¾''	1476.0	203.6	13.79
½''	2708.0	657.0	24.26
3/8''	1007.6	287.2	28.50
¼''	905.0	287.3	31.75
M ₁ =ΣR ₁ =	6210.6	1435.1	=M ₂ =Σm ₁
Índice Global de Alargamiento (I_L)			23.11

4.1.4 Resistencia al desgaste del agregado grueso (INV E-218-07).

Conforme a lo estipulado en la norma INVIAS, el ensayo se realizó siguiendo los parámetros estipulados en la Tabla 12, donde se tomó la gradación más similar al agregado que se va a usar en la obra. Se separa la muestra en las fracciones indicadas como se indica en la tabla, y de acuerdo con la granulometría se toma la cantidad de cada una de ellas indicada en la parte de carga abrasiva, hasta obtener el requerimiento para el tamaño de la muestra total.

Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 13, los cuales cumplen satisfactoriamente con las especificaciones de la norma INVIAS, obteniendo como resultado un 35.54 % de desgaste.

Tabla 12, Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo y Carga abrasiva.

Tamaño Fracción				Masa de muestra para ensayos (g)			
Pasa Tamiz		Retenido Tamiz		granulometrías			
Mm	No.	Mm	No.	A	B	C	D
37.5	1½"	25.0	1"	1250 ± 25	...	...	...
25.0	1"	19.0	¾"	1250 ± 25	...	...	...
19.0	¾"	12.5	½"	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5	½"	9.5	3/8"	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5	3/8"	6.3	¼"	...	...	2500 ± 10	...
6.3	¼"	4.75	No. 4	...	...	2500 ± 10	...
4.75	No. 4	2.36	No. 8	...	...	...	5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Carga Abrasiva		No. Esferas		12	11	8	6
		Masa total (g)		5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 20	2500 ± 15
		No. Vueltas		500			

Tabla 13, Resultado a la resistencia al desgaste de los agregados gruesos.

RESULTADOS	
Tipo de granulometría	B
No. De esferas	11
Peso inicial de la muestra (g)	5000
Peso final de la muestra lavada en 1.70 mm, No. 12 (g)	3223.2
% Degaste	35.54 %

4.1.5 Contenido de materia orgánica en arenas (INV E-212-07).

Los resultados presente en la Tabla 14, se analiza por medio del colorímetro recomendado por la ASTM C40 y se establece que la arena puede ser utilizada para concreto o morteros debido a que se encuentra libre de partículas orgánicas.

Tabla 14, Resultados del contenido de materia orgánica.

Color Estándar Gardner No.	Placa Orgánica No.	Descripción
5	1	Exento de material orgánico

4.1.6 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).

El ensayo se realizó siguiendo los parámetros establecidos en la norma correspondiente, con el fin de hallar el tamaño máximo nominal del agregado grueso, de igual manera el módulo de finura para los agregados finos debido a que es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto. La granulometría de los materiales gruesos se presentan en la Tabla 15. La del agregado fino se presenta en la Tabla 16.

Tabla 15, Resultado de la granulometría del agregado grueso.

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO					
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
1"	25.40	114	1.84	1.84	98.16
¾"	19.05	1476	23.77	25.60	74.40
½"	12.70	2708	43.60	69.20	30.80
3/8"	9.53	1007.6	16.22	85.43	14.57
¼"	6.35	905	14.57	100.00	0.00
		6210.6	100.00		

Tabla 16, Resultado de la granulometría del agregado fino.

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO					
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
No. 4	4.75	286.0	11.01	11.01	88.99
No. 8	2.36	324.8	12.50	23.50	76.50
No. 16	1.18	710.2	27.33	50.84	49.16
No. 30	0.60	581.4	22.37	73.21	26.79
No. 50	0.30	421.0	16.20	89.41	10.59
No. 100	0.15	126.4	4.86	94.27	5.73
No. 200	0.075	66.4	2.56	96.83	3.17
Pasa 200		82.4	3.17	100.00	0.00
		2598.6	100.00		

4.1.7 Gravedad específica y absorción de agregados.

Los ensayos correspondiente para cada tipo de agregado los cuales determinan la relación existente entre la masa y el volumen de los materiales granulares respecto a la masa y el volumen del agua, así como la absorción de los agregados que se emplea en el cálculo de volúmenes ocupados por el material o mezcla en sus diferentes condiciones, por el contenido de agua y el cambio de masa del material debido a la absorción del agua por los poros.

4.1.7.1 Gravedad específica y absorción de agregados finos (INV E-222-07).

En el ensayo planteado en la norma (INV E-222-07), se logra evaluar la gravedad específica y absorción de agregados finos, los datos adquiridos durante la investigación y resultados se detallado en la Tabla 17.

Tabla 17, Resultados de la gravedad específica y absorción de los agregados finos.

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ADSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS		
Masa al aire de la muestra seca al horno (g)		488.2
Masa del picnómetro aforado lleno de agua (g)		698
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (g)		1006
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)		500
PESO ESPECIFICO		
Gravedad Especifica Bulk Gsb $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.54
Gravedad Especifica Bulk Gsb sss $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.60
Gravedad Específica Aparente Gsa $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.71
% Absorción		2.42

4.1.7.2 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV E-223-07).

En la Tabla 18, se reflejan los datos adquiridos durante la investigación y los resultados obtenidos para el material particular grueso, siguiendo los parámetros estipulados en la norma INVIAS.

Tabla 18, Resultados de la gravedad específica y absorción de los agregados gruesos.

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ADSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS		
Masa en el aire de la muestra seca (g)		2679
Masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca (g)		2746
Masa sumergida en agua de la muestra saturada (g)		1677
PESO ESPECIFICO		
Gravedad Especifica Bulk Gsb $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.51
Gravedad Especifica Bulk Gsb sss $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.57
Gravedad Específica Aparente Gsa $_{23^{\circ}/23^{\circ}\text{C}}$	g/cm^3	2.67
% Absorción		2.50

4.1.8 Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).

Los resultados tienen como objeto establecer el método para determinar la densidad bulk (peso unitario) y el porcentaje de los vacíos de los agregados, ya sean finos, gruesos o una mezcla de ambos. Estos resultados se detallan en la Tabla 19.

Tabla 19, Resultado de masa unitaria y porcentaje de vacíos.

MASA UNITARIA Y PORCENTAJE DE VACÍOS (AGREGADOS GRUESOS)	
Masa Unitaria Suelta (kg/m ³)	1443.86
Masa Unitaria Compacta (kg/m ³)	1525.75
% Vacíos Suelta	42.36
% Vacíos Compacta	39.09
MASA UNITARIA Y PORCENTAJE DE VACÍOS (AGREGADOS FINOS)	
Masa Unitaria Suelta (kg/m ³)	1615.09
Masa Unitaria Compacta (kg/m ³)	1706.24
% Vacíos Suelta	36.29
% Vacíos Compacta	32.69

4.1.9 Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E-305-07).

Los resultados de los tiempos de fraguado proporcionan una idea del período disponible para mezclar, transportar, colocar, vibrar y apisonar los concretos y morteros en una obra así como el tiempo necesario para transitar sobre ellos y el tiempo para empezar el curado. La toma de los datos de este ensayo se encuentra disponible en las Tablas 20 al 23 para cada porcentaje de adición (0%, 5%, 10% y 15%) de ceniza volante como peso del cemento.

Tabla 20, Tiempo de fraguado del cemento con 0% de adición de ceniza volante.

TIEMPO DE FRAGUADO (CEMENTO + 0% DE CENIZA)			
Tiempo de prueba		Penetración (mm)	Temperatura ambiente °C
Lectura de horas	Hora		
10:00	0.00	40	23
10:15	0.25	40	23
10:30	0.50	40	23
10:45	0.75	40	23
11:00	1.00	40	23
11:15	1.25	40	23
11:30	1.50	40	24
11:45	1.75	36	24
12:00	2.00	31	24

12:15	2.25	23	24
12:30	2.50	9	24
12:45	2.75	2	24
13:00	3.00	1	24
13:15	3.25	1	24
13:30	3.50	0	24
Temperatura ambiente promedio			23.60

Tabla 21, Tiempo de fraguado del cemento con 5% de adición de ceniza volante.

TIEMPO DE FRAGUADO (CEMENTO + 5% DE CENIZA)			
Tiempo de prueba		Penetración (mm)	Temperatura ambiente °C
Lectura de horas	Hora		
10:30	0.00	40	23
10:45	0.25	40	23
11:00	0.50	40	23
11:15	0.75	40	23
11:30	1.00	40	23
11:45	1.25	40	23
12:00	1.50	37	24
12:15	1.75	34	24
12:30	2.00	32	24
12:45	2.25	28	24
13:00	2.50	23	24
13:15	2.75	5	24
13:30	3.00	4	24
13:45	3.25	4	24
14:00	3.50	2	24
14:15	3.75	1	24
14:30	4.00	0	24
Temperatura ambiente promedio			23.65

Tabla 22, Tiempo de fraguado del cemento con 10% de adición de ceniza volante.

TIEMPO DE FRAGUADO (CEMENTO + 10% DE CENIZA)			
Tiempo de prueba		Penetración (mm)	Temperatura ambiente °C
Lectura de horas	Hora		
09:55	0.00	40	23
10:10	0.25	40	23
10:25	0.50	40	22
10:40	0.75	37	22
10:55	1.00	36	21

11:10	1.25	34	22
11:25	1.50	28	22
11:40	1.75	20	22
11:55	2.00	15	22
12:10	2.25	9	24
12:25	2.50	3	23
12:40	2.75	3	23
12:55	3.00	1	25
13:10	3.25	1	24
13:25	3.50	1	25
13:40	3.75	0.5	24
13:55	4.00	0.5	23
14:10	4.25	0	25
Temperatura ambiente promedio			23.06

Tabla 23, Tiempo de fraguado del cemento con 15% de ceniza volante.

TIEMPO DE FRAGUADO (CEMENTO + 15% DE CENIZA)			
Tiempo de prueba		Penetración (mm)	Temperatura ambiente °C
Lectura de horas	Hora		
09:00	0.00	40	23
09:15	0.25	40	22
09:30	0.50	40	23
09:45	0.75	40	24
10:00	1.00	38	21
10:15	1.25	35	22
10:30	1.50	30	23
10:45	1.75	26	24
11:00	2.00	26	25
11:15	2.25	19	24
11:30	2.50	5	23
11:45	2.75	5	22
12:00	3.00	3	25
12:15	3.25	2	24
12:30	3.50	1	25
12:45	3.75	0.5	22
13:00	4.00	0	25
Temperatura ambiente promedio			23.35

4.1.10 Densidad del cemento hidráulico (INV E-307-07).

El ensayo es requisito para determinar el volumen que ocupa el cemento dentro de un metro cubico de concreto, es decir, está relacionado con los parámetros del diseño y control de la mezcla del concreto (Sánchez De Guzmán, 2001), los resultados se presenta en la Tabla 24, para el cemento con los diferentes porcentajes de ceniza volante.

Tabla 24, Densidades del cemento con los diferentes porcentajes de ceniza volante.

Densidad del cemento (CEMENTO DIAMANTE)	
Densidades con la adición de ceniza volante	Valor (g/cm³)
Cemento + 0% de ceniza	2.94
Cemento + 5% de ceniza	2.81
Cemento + 10% de ceniza	2.82
Cemento + 15% de ceniza	2.78

4.1.11 Consistencia normal del cemento (INV E-310-07).

Es la cantidad de agua necesaria para que la pasta de cemento alcance una fluidez óptima y una plasticidad ideal. Los valores de la consistencia normal están representados en la Tabla 25. Se utiliza principalmente para determinar el tiempo de fraguado, la estabilidad de volumen, el calor de hidratación y la resistencia mecánica. Es un factor que no es índice de calidad del cemento.

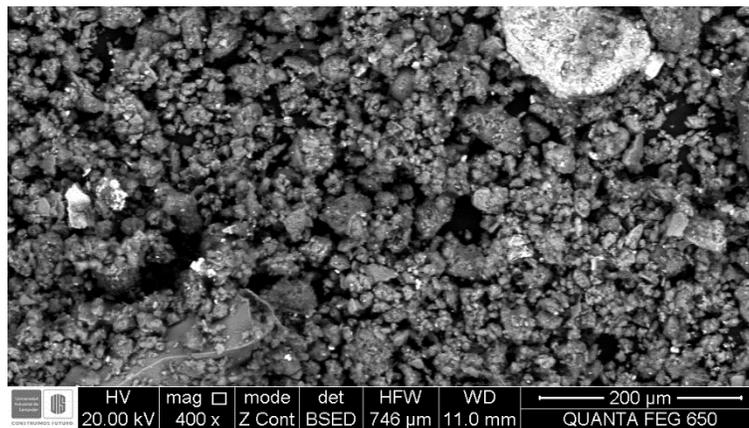
Tabla 25, Consistencia normal del cemento con los diferentes tipos de adición.

CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO		
Tipo de mezcla	Agua (ml)	Penetración (mm)
Cemento + 0% de ceniza	140	18
	136	10
	135	8
	130	6
Cemento + 5% de ceniza	135	13
	130	7
	133	10
Cemento + 10% de ceniza	128	10
	127	8
	129	11
Cemento + 15% de ceniza	123	9
	124	8
	122	10

4.1.12 Clasificación de la ceniza volante.

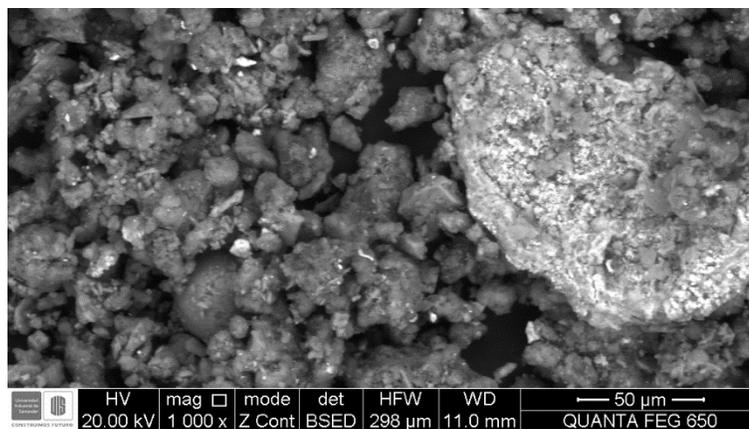
Con el propósito de clasificar la ceniza volante, fue sometida al análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) realizado en el laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander. Según el informe INF-009-14, se pudo determinar que la ceniza volante es de tipo N. en la Figuras 5 a la 7 se muestran las magnificación de 400x, 1000x y 5000x respectivamente por el detector de electrones Retrodispersados “Backscater Electrón Detector” (BSED).

Figura 5, Ceniza ampliada a 400x.



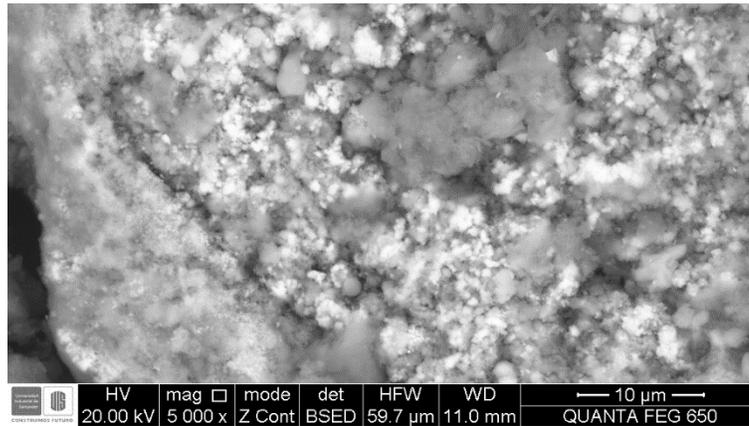
Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

Figura 6, Ceniza ampliada a 1000x.



Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

Figura 7, Ceniza ampliada a 5000x.



Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

Tabla 26, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 400x.

Element	Wt%	At%
CK	12.17	20.77
OK	34.35	44.00
NaK	00.19	00.17
MgK	08.44	07.12
AlK	09.48	07.20
SiK	16.51	12.05
PK	00.29	00.19
SK	02.97	01.90
KK	03.53	01.85
CaK	02.12	01.09
TiK	00.84	00.36
VK	00.08	00.03
FeK	08.23	03.02
ZnK	00.79	00.25
Matrix	Correction	ZAF

Tabla 27, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 1000x.

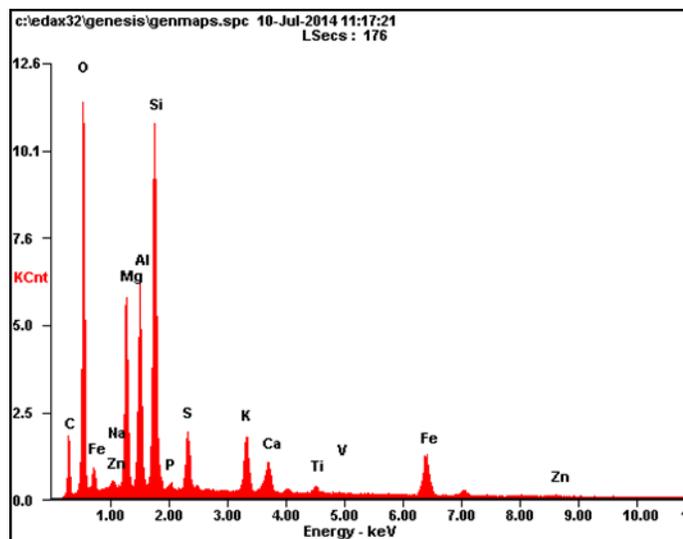
Element	Wt%	At%
CK	09.89	23.56
OK	17.79	31.80
MgK	00.33	00.38
AlK	04.77	05.06
SiK	05.49	05.59
PK	00.34	00.31

SK	04.20	03.74
KK	00.20	00.15
CaK	01.31	00.93
MnK	00.84	00.44
FeK	53.84	27.58
ZnK	01.02	00.45
Matrix	Correction	ZAF

Tabla 28, Resultados EDS de la ceniza ampliada a 5000x.

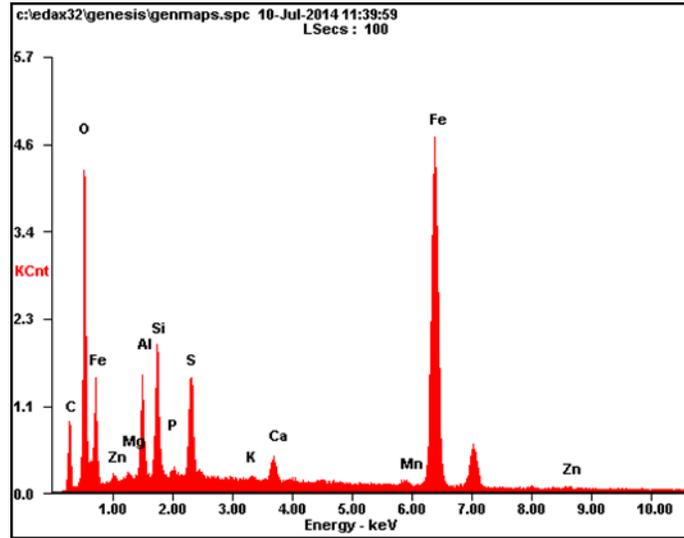
Element	Wt%	At%
CK	18.27	36.88
OK	14.30	21.67
MgK	00.29	00.29
AlK	06.68	06.00
SiK	06.75	05.83
PK	00.26	00.21
SK	17.34	13.11
KK	00.28	00.18
CaK	01.79	01.08
TiK	00.30	00.15
FeK	33.04	14.34
ZnK	00.70	00.26
Matrix	Correction	ZAF

Figura 8, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 400x.



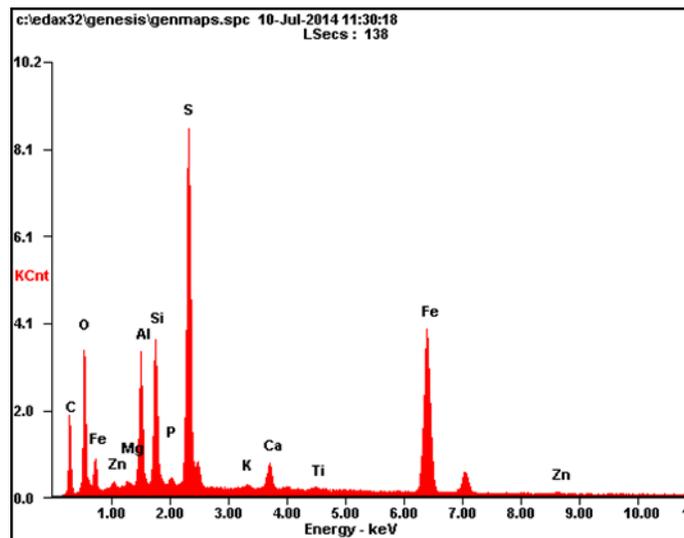
Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

Figura 9, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 1000x.



Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

Figura 10, Resultados grafico EDS de la ceniza ampliada a 5000x.



Fuente: INF-009-14 de julio de 2014.

4.2 Dosificación de la mezcla del concreto.

La dosificación implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen al concreto, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado o pegado correctos.

4.2.1 Estimación del contenido de agregados (finos y gruesos). Por el método del menor porcentaje de vacíos.

El diseño de mezcla utilizado tomo parámetros de los agregados el concepto de menor porcentaje de vacíos, el cual indica que se debe tomar la mezcla que posea el menor porcentaje. En la Tabla 29 se muestran las mezclas de arena y grava con sus respectivos porcentajes de vacíos.

Tabla 29, Resultados menor porcentaje de vacíos.

Menor Porcentaje de Vacíos						
Mezclas	Muestra	MUSCc	Arena (%)	Grava (%)	PEC	% Vacíos
1	M3	1712.701	70	30	2.698	0.368
2	M4	1783.486	60	40	2.694	0.338
3	M5	1841.199	50	50	2.690	0.316
4	M6	1879.004	40	60	2.686	0.300
5	M7	1851.455	30	70	2.682	0.310
6	M8	1807.415	20	80	2.678	0.325

4.2.2 Ajuste a la mezcla de prueba.

El diseño explicado anteriormente en el trabajo de grado es necesario volver calcular las proporciones de los diferentes materiales que componen el concreto, debido a que se modificó por las bajas resistencia, cambiando la relación A/C.

4.3 Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).

Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de los cilindros fundidos con las diferentes mezclas (0%, 5%, 10% y 15% de ceniza volante como adición al peso del cemento), se determina fundamentalmente que las mezclas cumplan con los requisitos de la resistencia y así mirar la calidad del concreto.

A continuación en las Tablas 30 a la 33, se observa la resistencia promedio a la compresión de los especímenes con las diferentes mezclas empleadas, siguiendo los parámetros establecidos en la norma INV E-410-07, para garantizar el control de calidad.

Tabla 30, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 0% de ceniza.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (Cemento + 0% de ceniza volante)					
Diámetro (mm)		Altura (mm)		Carga (KN)	Tipo de falla
153	155	310	311	490.55	E
153	154	308	310	450.44	D
152	153	308	308	455.75	D
Diámetro Promedio (m)		0.15333	Carga Promedio (KN)		465.58
FALLA				25224.40	KN/m ²
				25.22	Mpa
				3658.48	Psi

Tabla 31, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 5% de ceniza.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (Cemento + 5% de ceniza volante)					
Diámetro (mm)		Altura (mm)		Carga (KN)	Tipo de falla
154	154	308	306	427.73	D
152	153	304	305	412.28	D
153	153	305	304	425.28	D
Diámetro Promedio (m)		0.15317	Carga Promedio (KN)		421.76
FALLA				22889.10	KN/m ²
				22.89	Mpa
				3319.91	Psi

Tabla 32, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 10% de ceniza.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (Cemento + 10% de ceniza volante)					
Diámetro (mm)		Altura (mm)		Carga (KN)	Tipo de falla
152	152	303	304	385.31	D
151	151	303	304	390.45	D
150	150	300	302	376.08	D
Diámetro Promedio (m)		0.1533	Carga Promedio (KN)		383.95
FALLA				21440.30	KN/m ²
				21.44	Mpa
				3109.61	Psi

Tabla 33, Resultados a la compresión de los cilindros de concreto con 15% de ceniza.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (Cemento + 15% de ceniza volante)					
Diámetro (mm)		Altura (mm)		Carga (KN)	Tipo de falla
151	151	304	304	379.31	D
151	152	306	303	372.37	D
153	153	300	300	378.92	D
Diámetro Promedio (m)		0.1533	Carga Promedio (KN)		376.87
FALLA				20823.70	KN/m ²
				20.82	Mpa
				3019.68	Psi

4.4 Velocidad de absorción de agua por concreto (ASTM C1585–13).

A continuación siguiendo los parámetros de la ASTM C1585-15 para determinar la infiltración del agua o absorción, se detallan los datos iniciales de cada núcleo Tabla 34 y los resultados obtenidos durante 6 días de ensayo para cada muestra en las Tablas 35 a la 50.

Tabla 34, Datos iniciales para el ensayo de absorción del agua por el concreto.

Muestras	Masa Inicial (g)	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
0%	1	312.002	52.95
	2	334.191	52.18
	3	284.924	53.11
	4	324.558	53.19
5%	5	299.802	52.53
	6	286.308	52.70
	7	285.937	52.98
	8	292.870	53.90
10%	9	303.595	52.88
	10	318.458	53.53
	11	314.713	53.36
	12	305.638	53.18
15%	13	303.717	53.51
	14	344.753	53.28
	15	292.829	52.38
	16	279.160	52.79

Cemento + 0% de ceniza volante.

Tabla 35, Absorción de la muestra 1 concreto con 0% de ceniza.

Absorción Muestra 1					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	312,002	0,00	0,0000
09:45	300	17	312,366	0,36	0,1653
10:00	900	30	312,463	0,46	0,2094
10:30	1800	42	312,611	0,61	0,2766
11:30	3600	60	312,790	0,79	0,3579
15:00	12600	112	313,219	1,22	0,5527
15:30	14400	120	313,222	1,22	0,5541
16:00	16200	127	313,224	1,22	0,5550
16:30	18000	134	313,283	1,28	0,5818
09:45	86700	294	314,049	2,05	0,9296
10:15	174900	418	314,795	2,79	1,2684
10:10	347400	589	315,741	3,74	1,6980
10:35	435300	660	316,135	4,13	1,8770
08:50	515400	718	316,398	4,40	1,9964

Tabla 36, Absorción de la muestra 2 concreto con 0% de ceniza.

Absorción Muestra 2					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	334,191	0,00	0,0000
09:45	300	17	334,541	0,35	0,1638
10:00	900	30	334,737	0,55	0,2555
10:30	1800	42	334,807	0,62	0,2882
11:30	3600	60	335,012	0,82	0,3841
15:00	12600	112	335,451	1,26	0,5895
15:30	14400	120	335,456	1,27	0,5918
16:00	16200	127	335,499	1,31	0,6119
16:30	18000	134	335,564	1,37	0,6423
09:45	86700	294	336,456	2,27	1,0595
10:15	174900	418	337,263	3,07	1,4370
10:10	347400	589	338,260	4,07	1,9033
10:35	435300	660	338,626	4,44	2,0745
08:50	515400	718	339,025	4,83	2,2611

Tabla 37, Absorción de la muestra 3 concreto con 0% de ceniza.

Absorción Muestra 3					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	284,924	0,00	0,0000
09:45	300	17	285,647	0,72	0,3265
10:00	900	30	286,125	1,20	0,5422
10:30	1800	42	286,415	1,49	0,6731
11:30	3600	60	286,838	1,91	0,8640
15:00	12600	112	288,152	3,23	1,4571
15:30	14400	120	288,210	3,29	1,4833
16:00	16200	127	288,368	3,44	1,5546
16:30	18000	134	288,458	3,53	1,5952
09:45	86700	294	290,121	5,20	2,3459
10:15	174900	418	291,449	6,53	2,9453
10:10	347400	589	292,903	7,98	3,6016
10:35	435300	660	293,55	8,63	3,8936
08:50	515400	718	294,076	9,15	4,1310

Tabla 38, Absorción de la muestra 4 concreto con 0% de ceniza.

Absorción Muestra 4					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	324,558	0,00	0,0000
09:45	300	17	324,958	0,40	0,1800
10:00	900	30	325,158	0,60	0,2701
10:30	1800	42	325,241	0,68	0,3074
11:30	3600	60	325,471	0,91	0,4109
15:00	12600	112	326,087	1,53	0,6882
15:30	14400	120	326,110	1,55	0,6985
16:00	16200	127	326,133	1,57	0,7089
16:30	18000	134	326,223	1,67	0,7494
09:45	86700	294	327,408	2,85	1,2828
10:15	174900	418	328,443	3,88	1,7486
10:10	347400	589	329,547	4,99	2,2455
10:35	435300	660	330,083	5,53	2,4868
08:50	515400	718	330,393	5,83	2,6263

Cemento + 5% de ceniza volante.

Tabla 39, Absorción de la muestra 5 concreto con 5% de ceniza.

Absorción Muestra 5					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	299,802	0,00	0,0000
09:45	300	17	300,470	0,67	0,3084
10:00	900	30	300,746	0,94	0,4358
10:30	1800	42	300,944	1,14	0,5272
11:30	3600	60	301,349	1,55	0,7141
15:00	12600	112	302,123	2,32	1,0713
15:30	14400	120	302,184	2,38	1,0995
16:00	16200	127	302,223	2,42	1,1175
16:30	18000	134	302,363	2,56	1,1821
09:45	86700	294	303,655	3,85	1,7784
10:15	174900	418	304,669	4,87	2,2463
10:10	347400	589	305,846	6,04	2,7895
10:35	435300	660	306,361	6,56	3,0272
08:50	515400	718	306,686	6,88	3,1772

Tabla 40, Absorción de la muestra 6 concreto con 5% de ceniza.

Absorción Muestra 6					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	286,308	0,00	0,0000
09:45	300	17	287,488	1,18	0,5412
10:00	900	30	287,941	1,63	0,7489
10:30	1800	42	288,309	2,00	0,9176
11:30	3600	60	288,918	2,61	1,1968
15:00	12600	112	290,130	3,82	1,7525
15:30	14400	120	290,298	3,99	1,8295
16:00	16200	127	290,442	4,13	1,8955
16:30	18000	134	290,629	4,32	1,9812
09:45	86700	294	293,258	6,95	3,1865
10:15	174900	418	295,777	9,47	4,3414
10:10	347400	589	297,306	11,00	5,0424
10:35	435300	660	297,466	11,16	5,1157
08:50	515400	718	297,567	11,26	5,1620

Tabla 41, Absorción de la muestra 7 concreto con 5% de ceniza.

Absorción Muestra 7					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	285,937	0,00	0,0000
09:45	300	17	286,552	0,62	0,2793
10:00	900	30	286,76	0,82	0,3736
10:30	1800	42	287,041	1,10	0,5011
11:30	3600	60	287,384	1,45	0,6567
15:00	12600	112	288,125	2,19	0,9930
15:30	14400	120	288,171	2,23	1,0138
16:00	16200	127	288,224	2,29	1,0379
16:30	18000	134	288,306	2,37	1,0751
09:45	86700	294	289,638	3,70	1,6794
10:15	174900	418	290,819	4,88	2,2153
10:10	347400	589	292,311	6,37	2,8922
10:35	435300	660	292,865	6,93	3,1436
08:50	515400	718	293,303	7,37	3,3423

Tabla 42, Absorción de la muestra 8 concreto con 5% de ceniza.

Absorción Muestra 8					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	292,870	0,00	0,0000
09:45	300	17	293,312	0,44	0,1936
10:00	900	30	293,493	0,62	0,2729
10:30	1800	42	293,647	0,78	0,3404
11:30	3600	60	293,866	1,00	0,4364
15:00	12600	112	294,282	1,41	0,6187
15:30	14400	120	294,317	1,45	0,6341
16:00	16200	127	294,385	1,51	0,6639
16:30	18000	134	294,387	1,52	0,6648
09:45	86700	294	295,746	2,88	1,2604
10:15	174900	418	297,705	4,83	2,1189
10:10	347400	589	300,041	7,17	3,1428
10:35	435300	660	300,920	8,05	3,5280
08:50	515400	718	301,550	8,68	3,8041

Cemento + 10% de ceniza volante.

Tabla 43, Absorción de la muestra 9 concreto con 10% de ceniza.

Absorción Muestra 9					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	303,595	0,00	0,0000
09:45	300	17	304,107	0,51	0,2334
10:00	900	30	304,391	0,80	0,3628
10:30	1800	42	304,643	1,05	0,4775
11:30	3600	60	305,062	1,47	0,6683
15:00	12600	112	305,996	2,40	1,0937
15:30	14400	120	306,051	2,46	1,1188
16:00	16200	127	306,176	2,58	1,1757
16:30	18000	134	306,246	2,65	1,2076
09:45	86700	294	308,170	4,58	2,0838
10:15	174900	418	309,767	6,17	2,8111
10:10	347400	589	311,908	8,31	3,7862
10:35	435300	660	312,786	9,19	4,1861
08:50	515400	718	313,543	9,95	4,5309

Tabla 44, Absorción de la muestra 10 concreto con 10% de ceniza.

Absorción Muestra 10					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	318,458	0,00	0,0000
09:45	300	17	318,984	0,53	0,2339
10:00	900	30	319,233	0,78	0,3445
10:30	1800	42	319,455	1,00	0,4432
11:30	3600	60	319,841	1,38	0,6148
15:00	12600	112	320,639	2,18	0,9694
15:30	14400	120	320,708	2,25	1,0001
16:00	16200	127	320,744	2,29	1,0161
16:30	18000	134	320,769	2,31	1,0272
09:45	86700	294	322,300	3,84	1,7076
10:15	174900	418	323,604	5,15	2,2872
10:10	347400	589	325,391	6,93	3,0814
10:35	435300	660	326,098	7,64	3,3956
08:50	515400	718	326,718	8,26	3,6712

Tabla 45, Absorción de la muestra 11 concreto con 10% de ceniza.

Absorción Muestra 11					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	314,713	0,00	0,0000
09:45	300	17	315,394	0,68	0,3045
10:00	900	30	315,589	0,88	0,3917
10:30	1800	42	315,862	1,15	0,5138
11:30	3600	60	316,282	1,57	0,7016
15:00	12600	112	317,151	2,44	1,0901
15:30	14400	120	317,194	2,48	1,1094
16:00	16200	127	317,309	2,60	1,1608
16:30	18000	134	317,413	2,70	1,2073
09:45	86700	294	319,214	4,50	2,0126
10:15	174900	418	320,837	6,12	2,7383
10:10	347400	589	322,885	8,17	3,6541
10:35	435300	660	323,718	9,01	4,0266
08:50	515400	718	324,394	9,68	4,3288

Tabla 46, Absorción de la muestra 12 concreto con 10% de ceniza.

Absorción Muestra 12					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	305,638	0,00	0,0000
09:45	300	17	306,019	0,38	0,1715
10:00	900	30	306,144	0,51	0,2277
10:30	1800	42	306,314	0,68	0,3043
11:30	3600	60	306,606	0,97	0,4358
15:00	12600	112	307,201	1,56	0,7037
15:30	14400	120	307,282	1,64	0,7402
16:00	16200	127	307,296	1,66	0,7465
16:30	18000	134	307,365	1,73	0,7776
09:45	86700	294	308,604	2,97	1,3355
10:15	174900	418	309,794	4,16	1,8714
10:10	347400	589	311,403	5,76	2,5959
10:35	435300	660	312,07	6,43	2,8963
08:50	515400	718	312,609	6,97	3,1390

Cemento + 15% de ceniza volante.

Tabla 47, Absorción de la muestra 13 concreto con 15% de ceniza.

Absorción Muestra 13					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	303,717	0,00	0,0000
09:45	300	17	304,431	0,71	0,3174
10:00	900	30	304,863	1,15	0,5095
10:30	1800	42	305,251	1,53	0,6820
11:30	3600	60	305,781	2,06	0,9176
15:00	12600	112	306,889	3,17	1,4103
15:30	14400	120	307,030	3,31	1,4730
16:00	16200	127	307,099	3,38	1,5037
16:30	18000	134	307,226	3,51	1,5601
09:45	86700	294	309,121	5,40	2,4027
10:15	174900	418	310,517	6,80	3,0235
10:10	347400	589	312,289	8,57	3,8114
10:35	435300	660	312,976	9,26	4,1168
08:50	515400	718	313,496	9,78	4,3481

Tabla 48, Absorción de la muestra 14 concreto con 15% de ceniza.

Absorción Muestra 14					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	344,753	0,00	0,0000
09:45	300	17	345,523	0,77	0,3453
10:00	900	30	345,996	1,24	0,5575
10:30	1800	42	346,311	1,56	0,6988
11:30	3600	60	346,943	2,19	0,9824
15:00	12600	112	348,108	3,35	1,5050
15:30	14400	120	348,219	3,47	1,5548
16:00	16200	127	348,326	3,57	1,6028
16:30	18000	134	348,411	3,66	1,6409
09:45	86700	294	350,656	5,90	2,6481
10:15	174900	418	352,473	7,72	3,4632
10:10	347400	589	354,72	9,97	4,4713
10:35	435300	660	355,917	11,16	5,0083
08:50	515400	718	356,797	12,04	5,4030

Tabla 49, Absorción de la muestra 15 concreto con 15% de ceniza.

Absorción Muestra 15					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	262,829	0,00	0,0000
09:45	300	17	263,425	0,60	0,2765
10:00	900	30	263,609	0,78	0,3619
10:30	1800	42	263,836	1,01	0,4673
11:30	3600	60	264,167	1,34	0,6209
15:00	12600	112	264,844	2,01	0,9352
15:30	14400	120	264,894	2,06	0,9584
16:00	16200	127	264,952	2,12	0,9853
16:30	18000	134	264,981	2,15	0,9988
09:45	86700	294	266,506	3,68	1,7066
10:15	174900	418	267,809	4,98	2,3114
10:10	347400	589	269,547	6,72	3,1182
10:35	435300	660	270,192	7,36	3,4176
08:50	515400	718	270,652	7,82	3,6311

Tabla 50, Absorción de la muestra 16 concreto con 15% de ceniza.

Absorción Muestra 16					
Tiempo de Prueba		√Tiempo	Masa	ΔMasa	I
Horas	Segundos	(Seg ^ 1/2)	(g)	(g)	(mm)
09:40	0	0	279,160	0,00	0,0000
09:45	300	17	279,628	0,47	0,2144
10:00	900	30	279,776	0,62	0,2821
10:30	1800	42	279,924	0,76	0,3499
11:30	3600	60	280,191	1,03	0,4722
15:00	12600	112	280,745	1,58	0,7260
15:30	14400	120	280,792	1,63	0,7475
16:00	16200	127	280,817	1,66	0,7589
16:30	18000	134	280,828	1,67	0,7640
09:45	86700	294	282,057	2,90	1,3269
10:15	174900	418	283,124	3,96	1,8156
10:10	347400	589	284,566	5,41	2,4761
10:35	435300	660	285,107	5,95	2,7239
08:50	515400	718	285,563	6,40	2,9327

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Caracterización de los agregados.

5.1.1 Humedad natural de los agregados (INV E-122-07).

Después de realizado cálculos pertinentes de la norma IINVIAS para determinar la humedad natural de los agregados, se observó que el agregado grueso posee un bajo porcentaje de humedad (1.15%), respecto al agregado fino que presento una humedad de (3.89%), de estos resultados se analiza que el agregado grueso presenta poca porosidad, lo cual se puede concluir que el agregado fino (Arena) aporta una cantidad de agua a la mezcla de concreto por el porcentaje obtenido, la cual se debe tener presente a la hora del pesado para fundir el concreto y no alterar la relación agua / cemento y afectar la resistencia deseada.

5.1.2 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV E-227-07).

Este ensayo se realizó según lo que se estipula en la norma correspondiente, el resultados obtenidos en el laboratorio fue de 87.64 % de caras fracturadas en la muestra total. De lo cual se concluye que la mayor parte del agregado disponible es acto proporcionando a la mezcla de concreto resistencia al esfuerzo cortante, debido a la fricción entre las partículas del agregado grueso, brindo estabilidad por lo que se genera una mayor acomodación generando una alta densidad en el concreto y por tanto una mayor resistencia.

5.1.3 Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (INV E-230-07).

Realizado los cálculos pertinentes, el índice de aplanamiento fue de 20.06, y el índice de alargamiento 23.11, indicando que el agregado grueso presenta una proporción mayor de partículas alargadas. Concluyendo que las partículas “lajuda” (alargadas y aplanadas), se encuentran en pequeñas proporciones las cuales no afectan representativamente la mezcla de concreto, ya que este tipos de partículas tienden a colocarse de en posición horizontal dentro de la mezcla de concreto compactada, impidiendo la salida del agua libre durante el proceso de fraguado lo que genera la aparición de burbujas de aire que debilitan la resistencia del concreto (Sánchez De Guzmán, 2001).

5.1.4 Resistencia al desgaste de los agregados (INV E-218-07).

Conforme a lo estipulado en la norma INVIAS, obteniendo la resistencia al desgaste, el agregado grueso empleado tuvo una gradación tipo B, presentando una resistencia aceptable al desgaste con un porcentaje de 35.54%, es decir que el agregado es aceptable para conseguir concreto resistentes al desgaste.

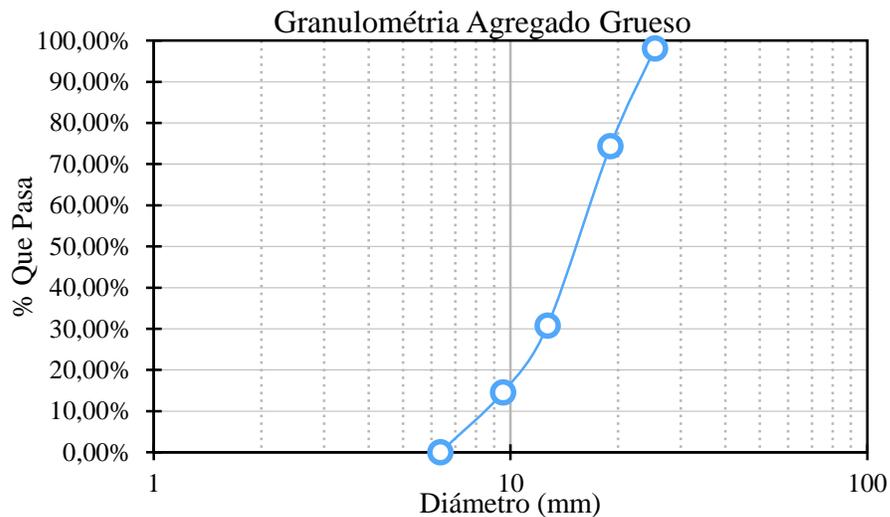
5.1.5 Contenido aproximado de materia orgánica en arenas (INV E-212-07).

El material analizado presentó el nivel más bajo de contenido orgánico, indicando que la arena no posee partículas que pueden afectar con la resistencia del concreto, resaltando que es adecuada en la preparación de concretos hidráulicos. Observar en el Anexo A (Figura 24).

5.1.6 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV E-213-07).

La representación gráfica de la granulometría de los materiales grueso (Figura 11) presenta un tamaño máximo nominal de 1".²⁵

Figura 11, Curva granulométrica de los agregados gruesos.

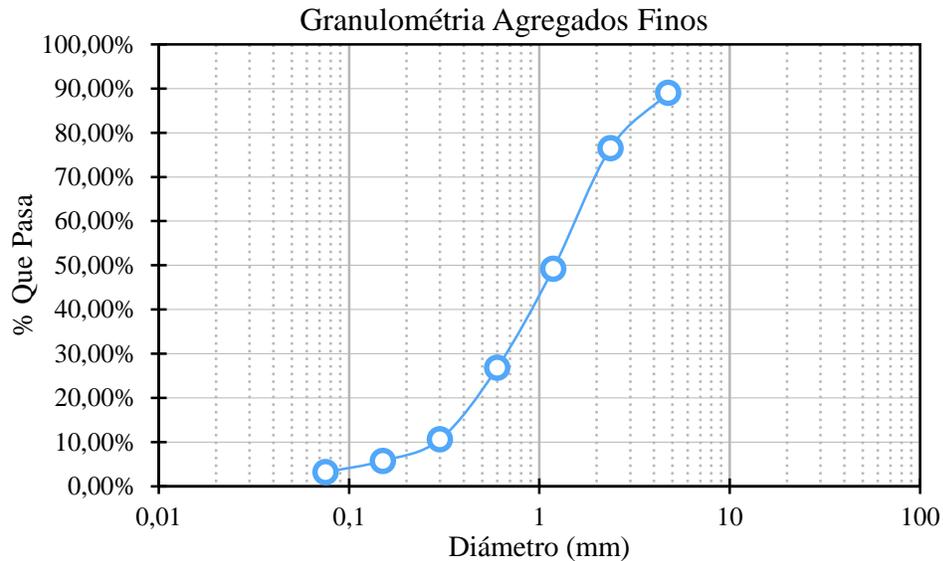


Fuente: Autor.

²⁵ El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

La representación gráfica de la granulometría de los materiales finos (Figura 12), basado en estos resultados obtenidos, se determinó un módulo de finura del arena a 3.42%, señalando que es una arena gruesa²⁶. Por lo cual se implementa el diseño de mezcla del menor porcentaje de vacíos.

Figura 12, Curva granulométrica de los agregados finos.



Fuente: Autor.

En general, el agregado fino debe cumplir con los requisitos establecidos en la normas INVIAS, es decir, no debe contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales como se refleja en el análisis de contenido de materia orgánica **Ítem 5.1.5**. Resaltando que la arena producida artificialmente deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas, y la arena natural estará constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos, durables.

²⁶ Arena gruesa: es la que sus granos pasan por un tamiz de 5mm de diámetro y son retenidos por otro de 2.5mm. Las arenas de granos gruesos dan, por lo general, morteros más resistentes que las finas, si bien tienen el inconveniente de necesitar mucha pasta de conglomerante para rellenar sus huecos y ser adherentes. En contra partida, el mortero sea plástico, resultando éste muy poroso y poco adherente.

5.1.7 Gravedad específica y absorción de agregados.

5.1.7.1 Gravedad específica y absorción de agregados finos (INV E-222-07).

Al analizar la muestra obtenidas del agregado fino presenta una gravedad específica de 2,60 g/cm³, que están por dentro de los rangos permitidos. Concluyendo que el material granular a emplearse en la mezcla de concreto está en el límite de aceptación. La densidad específica aparente es 2,71 g/cm³, definiendo la porosidad del material ya que cuanto más alto sea la densidad aparente menor será los vacíos presente en el agregado. Y un grado de absorción de 2.42% que es aceptable por las normas correspondientes.

5.1.7.2 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV E-223-07).

Se puede observar que la gravedad específica fue de 2,57 g/cm³ cumpliendo con los rangos establecidos (2,33 g/cm³ a 2,75 g/cm³), señalando que los agregados aptos para cualquier tipo de concretos en requisitos a su resistencia. Y la gravedad específica aparente fue de 2,67 indicando la porosidad del material, y la absorción que presenta el agregado grueso es de 2.50% lo cual se encuentra en los rangos de aceptación (0% al 5%.) de la norma INVIAS

5.1.8 Peso unitario y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos (INV E-217-07).

Al ser compactado el agregado grueso presentó una reducción en su porcentaje de vacíos indicando que la su densidad tuvo aumento, presentando una variación de 3.27% aproximadamente. Y el material de agregado fino presentó una reducción en su porcentaje de vacíos indicando que la su densidad tuvo aumento, la reducción de vacíos fue de 3.6% debido a que el material pasó por el proceso de compactación. Comparando dichos resultados se observa que los volúmenes de los vacíos de los agregados finos son mayores que los de los agregados gruesos debido a que este material presenta una forma, textura y un tamaño diferente, es decir por ser una arena con módulo de finura alto (Arena Gruesa)²⁷.

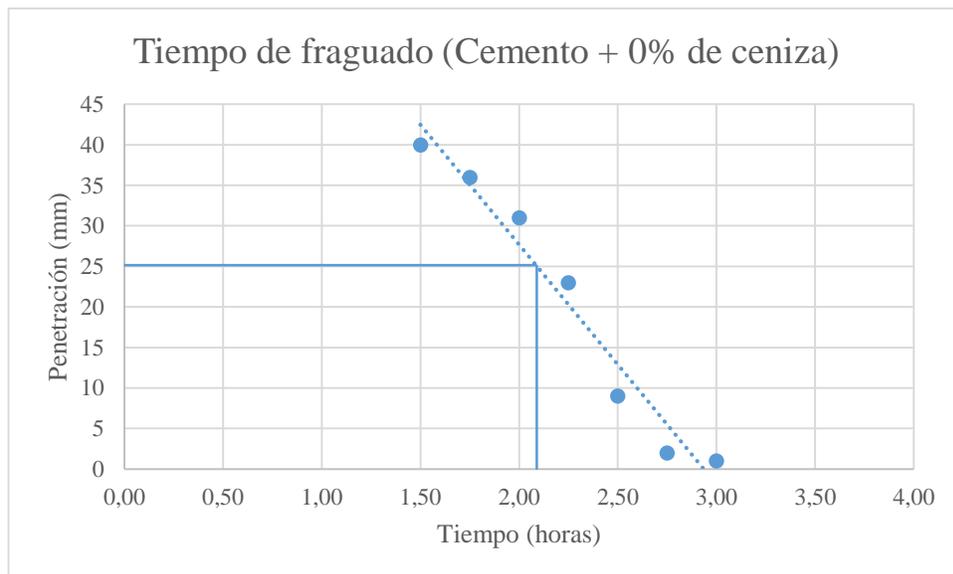
²⁷ Las arenas gruesas dan, por lo general, morteros más resistentes que las finas, si bien tienen el inconveniente de necesitar mucha pasta de conglomerante para rellenar sus huecos y ser adherentes. En contra partida, el mortero sea plástico, resultando éste muy poroso y poco adherente. Es decir, producir mezclas de concreto ásperas, segregables y propenso al sangrado.

5.1.9 Tiempo de fraguado del cemento hidráulico (INV E-305-07).

El fraguado es la pérdida de elasticidad que padece la pasta del cemento en un tiempo determinado después de haber sido hidratada con agua, no obstante hay muchos factores que determina el tiempo de fraguado como lo es la temperatura, la finura del cemento en otros; se debe tener en cuenta que el tiempo que transcurre desde el momento en que se agrega el agua, hasta que la pasta pierde viscosidad y eleva su temperatura se denomina tiempo de "fraguado inicial", e indica que la pasta está semisólida y parcialmente hidratada. Posteriormente la pasta sigue endureciendo hasta que deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega al mínimo de temperatura; el tiempo transcurrido desde que se echa el agua hasta que llega al estado descrito anteriormente se denomina "tiempo de fraguado final" e indica que el cemento se encuentra aún más hidratado (no totalmente) y la pasta ya está sólida (Gutiérrez de López, 2003).

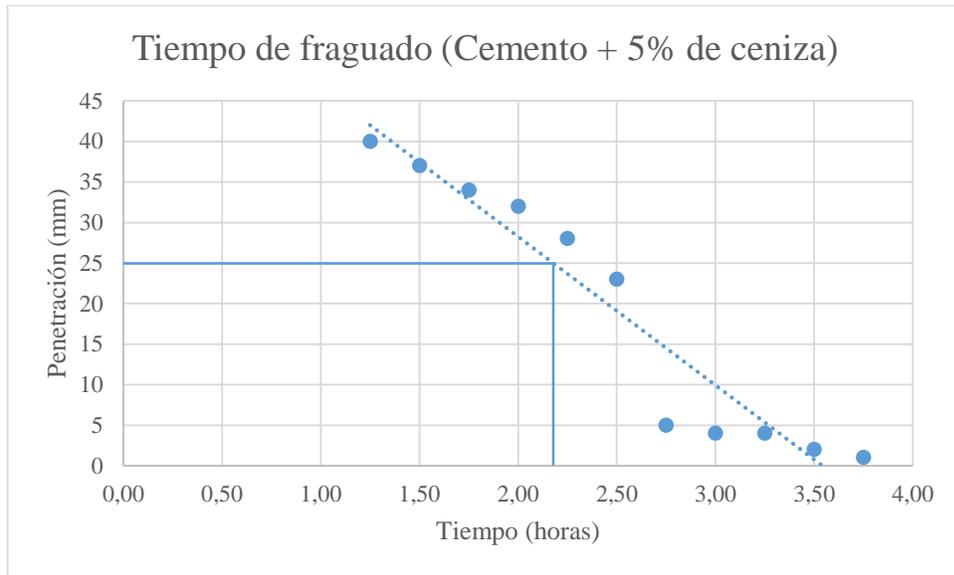
Para este ensayo, se considera que la ceniza volante posee gran influencia en el tiempo de fraguado. Cuando la penetración de la aguja es de 25 mm, se considera que se ha presentado el fraguado inicial y cuando la aguja deja una ligera marca sobre la superficie de la pasta, es considerado el fraguado final (Sánchez De Guzmán, 2001), que a partir de este momento empieza el proceso de endurecimiento y la pasta ya fraguada va adquiriendo resistencia. En las Figuras 13 a la 16, se observa el fraguado para cada mezcla con los diferentes grados de ceniza volante como adición al peso del cemento.

Figura 13, Tiempo de fraguado del cemento con 0% de adición de ceniza volante.



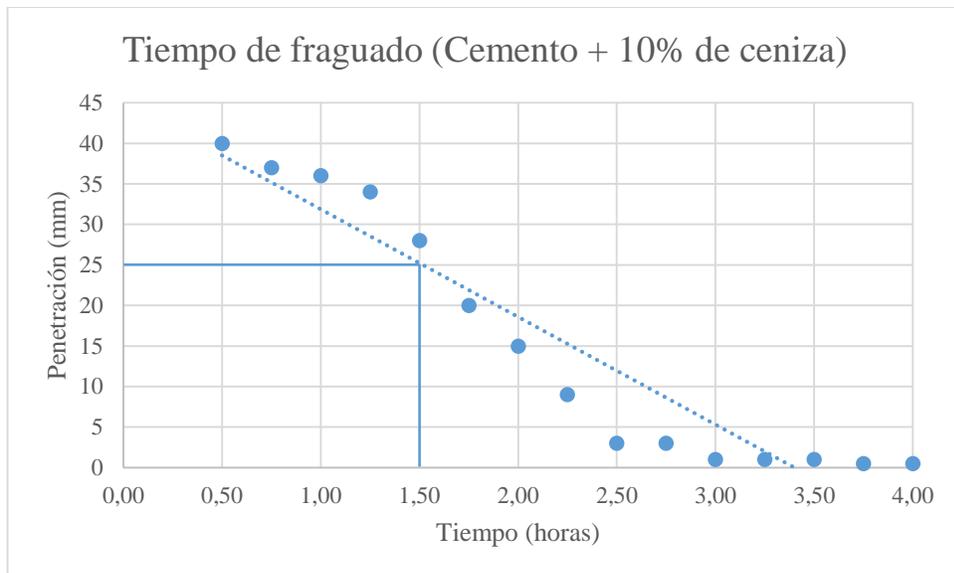
Fuente: Autor.

Figura 14, Tiempo de fraguado del cemento con 5% de adición de ceniza volante.



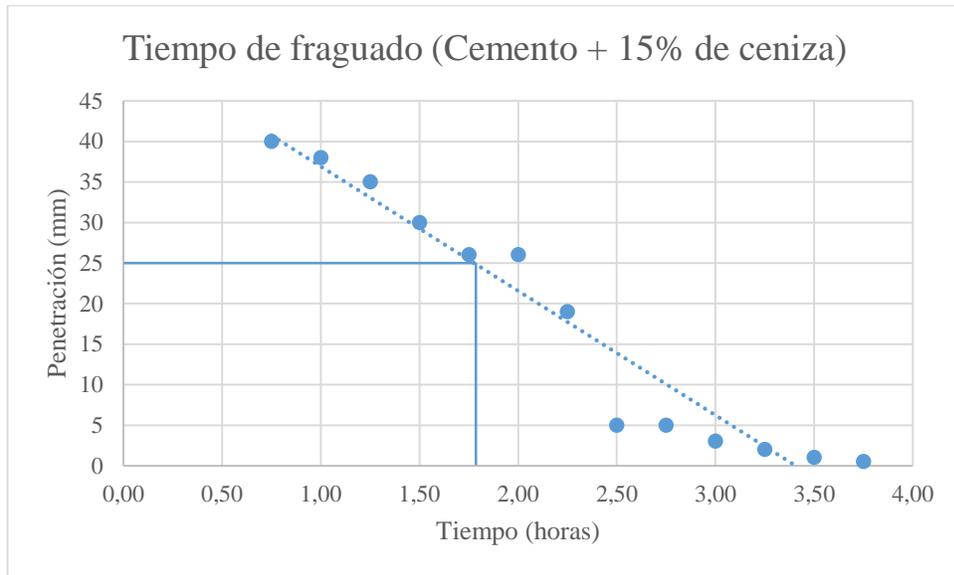
Fuente: Autor.

Figura 15, Tiempo de fraguado del cemento con 10% de adición de ceniza volante.



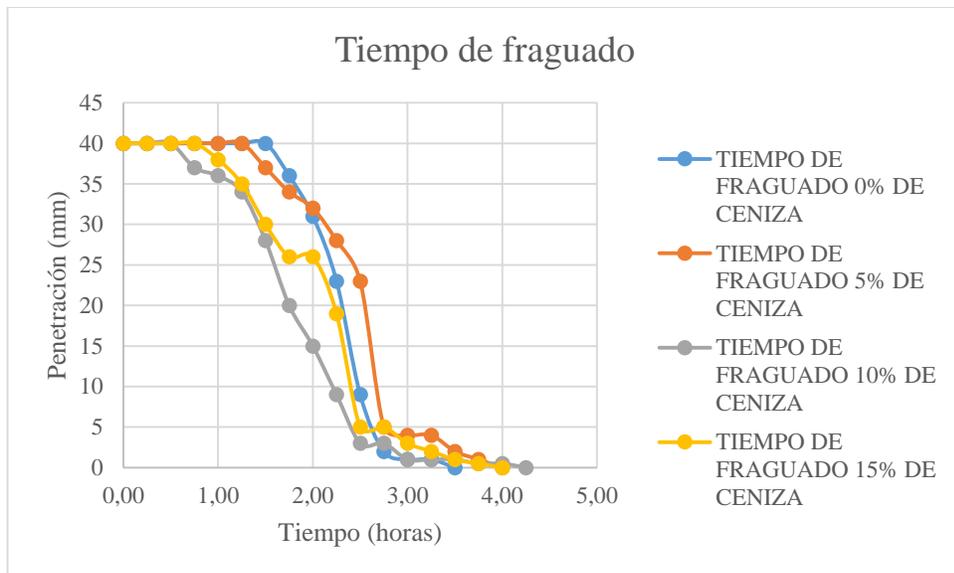
Fuente: Autor.

Figura 16, Tiempo de fraguado del cemento con 15% de adición de ceniza volante.



Fuente: Autor.

Figura 17, Tiempo de fraguado del cemento de las diferentes mezclas.

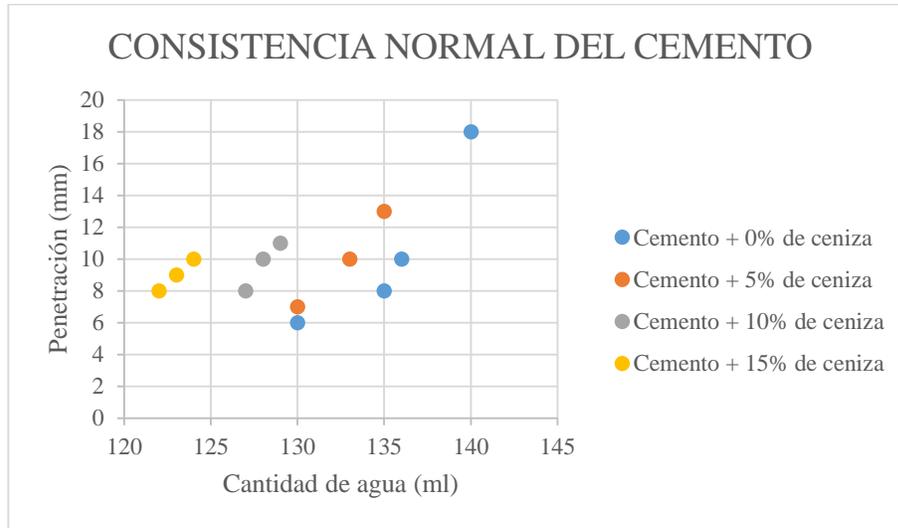


Fuente: Autor.

5.1.10 Consistencia normal del cemento (INV E-310-07).

Observando la Figura 18, se analiza que las mezclas de cemento que tengan mayor concentración de ceniza volante requieren de menor cantidad de agua.

Figura 18, Consistencia normal del cemento con los diferentes porcentajes de ceniza volante.



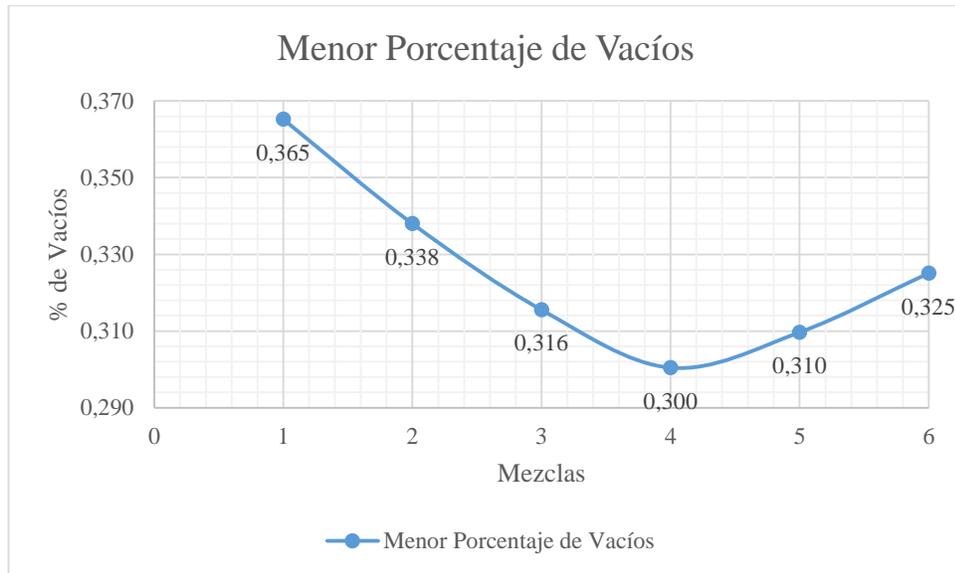
Fuente: Autor.

5.2 Dosificación de la mezcla del concreto.

Para el diseño de la mezcla de concreto se calculó con los principios básicos preestablecido en las normas del ICPC, las cuales están basadas en parámetros estipulados en las normas American Concrete Institute (ACI). Asimismo apoyándose en el concepto de menor porcentaje de vacíos de los agregados²⁸. El soporte en el concepto de menor porcentaje de vacío se debe al módulo de finura de la arena, que no está en los parámetros del ICPC. La grafica de menor porcentaje de vacíos Figura 19, donde se aprecia que en la mezcla 4 de la gráfica, que corresponde a la muestra M6 donde se establece que el contenido de Arena es de 40% y el de grava es 60%.

²⁸ Método de la Road Note Laboratory (RNL). Estimación del volumen de agregados, se utiliza cuando los agregados no cumplen con las recomendaciones granulométricas NTC 174 (Especificaciones de los agregados para concreto).

Figura 19, Resultados grafico del menor porcentaje de vacíos de los agregados.



Fuente: Autor.

Donde resulta de gran importancia que los porcentajes de arena no sean tan bajos, debido a que una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de ella demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua se necesita mayor cantidad de cemento para conservar una determinada relación agua-cemento.

Realizando el diseño de mezcla con una relación agua/cemento de 0.32, a la cual se le proporcione un 25% más de cemento con el propósito de garantizar la resistencia deseada, dado que los concretos con ceniza volante a temprana edades no alcanzan la resistencia máxima. Y siguiendo el método del menor porcentaje de vacíos se le adiciono el 40% de Arena y el 60% de grava. Concluyendo los resultados demostraron que al adicionar 25% más de cemento género las resistencias a la compresión deseadas para la realización de los ensayos de permeabilidad.

5.3 Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (INV E-410-07).

Se observa que el diseño de mezcla utilizado con la implementación del criterio de menor porcentaje de vacíos proporcione la resistencia deseada e inclusive resistencias mayores a los 3000 Psi, esto debido a como se mencionó con anterioridad los concretos con adición de ceniza volante alcanzan su resistencia final posterior a los 28 días de curado, destacando que los concretos con resistencias de los 3000 Psi son los que se utilizan comúnmente.

5.4 Velocidad de absorción del agua por el concreto (ASTM C1585–13).

Teniendo en cuenta principalmente que la densidad del agua para los cálculos realizados es $0.00099997 \text{ g/mm}^3$. Se realizó los cálculos para determinar el grado de infiltración de cada muestra, donde se ven reflejados en su forma gráfica en las Figuras 20 a la 23. Siendo necesario la implementación de la Ley de Darcy que describe las características del movimiento del agua a través de un medio poroso (proceso de absorción capilar).

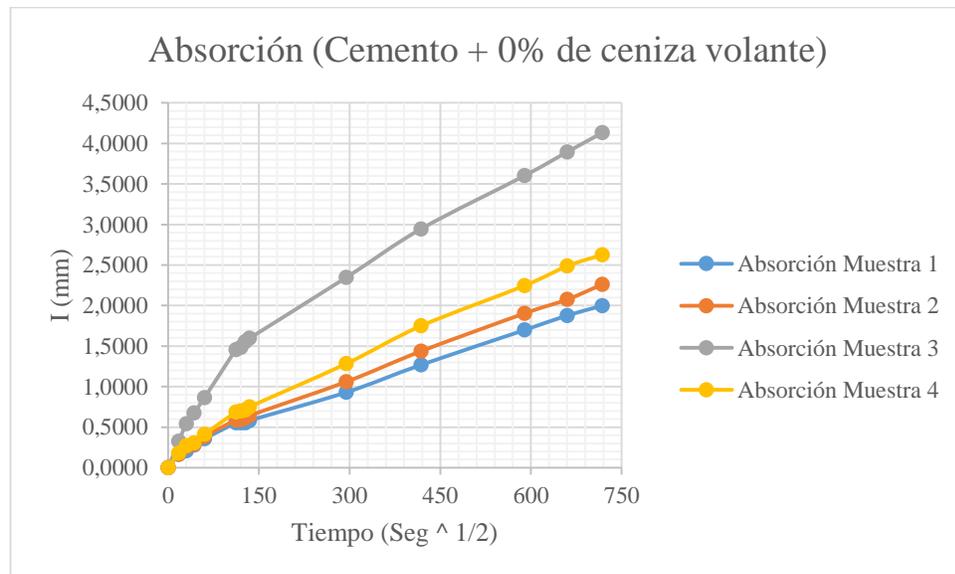
Los resultados promedios aplicando Darcy en las muestras de cada mezcla fue $2,06517\text{E-}09 \text{ m/s}$ para el concreto con 0% de ceniza volante, $7,51147\text{E-}09 \text{ m/s}$ para las mezcla con 5% de ceniza volante, $7,6008\text{E-}09 \text{ m/s}$ para las de 10% de ceniza volante y por ultimo las mezclas de concreto con el 15% de ceniza volante como adición del cemento fue de $7,91371\text{E-}09 \text{ m/s}$. logrando apreciar en la Tabla 51, que los concretos poseen alta permeabilidad en las diferentes mezclas.

Tabla 51, Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad.

Determinación	Unidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coficiente de permeabilidad al agua.	m/s	$< 10^{-12}$	10^{-12} a 10^{-10}	$> 10^{-10}$

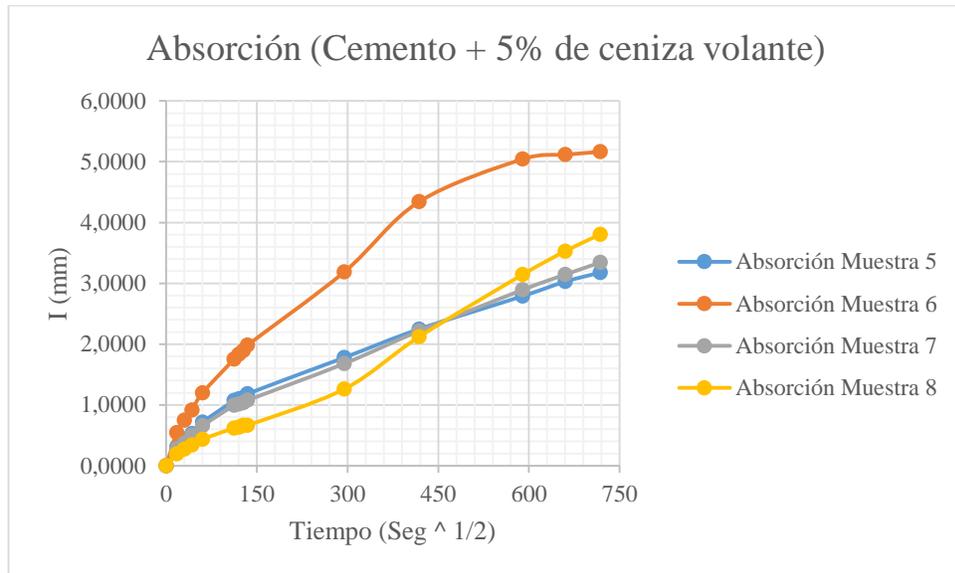
Fuente: Norma técnica colombiana NTC 4483

Figura 20, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 0% de ceniza volante.



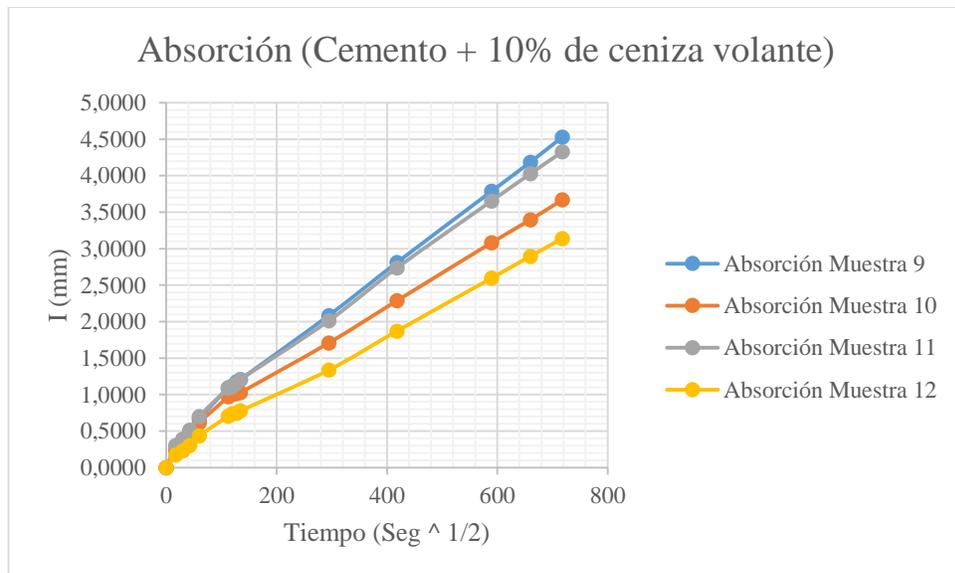
Fuente: Autor.

Figura 21, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 5% de ceniza volante.



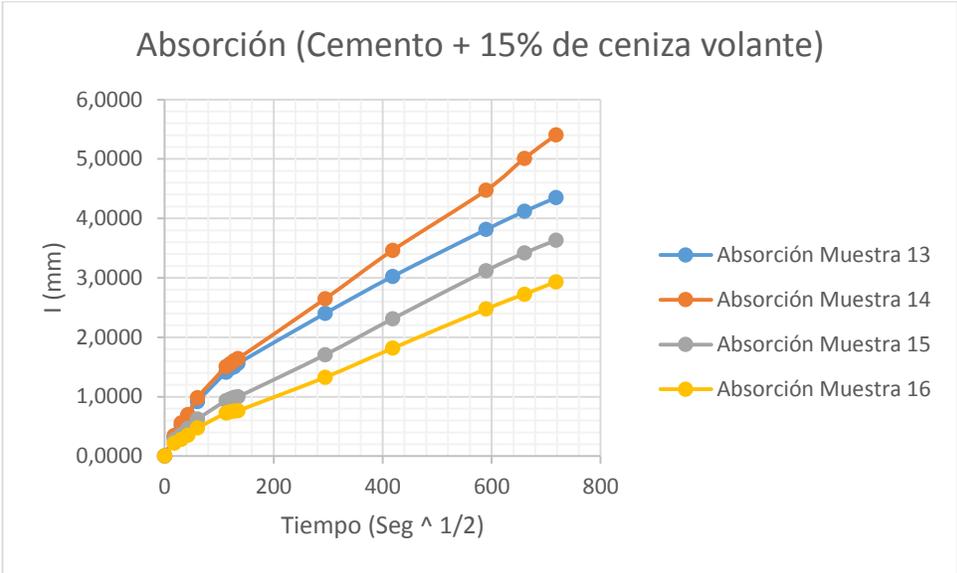
Fuente: Autor.

Figura 22, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 10% de ceniza volante.



Fuente: Autor.

Figura 23, Velocidad de absorción de agua para las muestras con 15% de ceniza volante.



Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

Este Trabajo de Grado resume el alcance de los objetivos específicos planteados inicialmente con el fin de evaluar el efecto en la permeabilidad del concreto preparado con ceniza añadida como porcentaje general del cemento. Conociendo que el concreto permeable es un material de estructura abierta con asentamiento o revenimiento cero, compuesto por cemento, agregado grueso, poco o nada de finos, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros interconectados, cuyo tamaño varía de 2 a 8 mm lo que permite el paso de agua.

Se concluye de los análisis correspondientes a cada ensayo empezando por la caracterización de los agregados que al momento de realizar la mezcla, el agregado fino va aportar una cantidad representativa de agua debido a su alto porcentaje de humedad, lo cual se debe tener en cuenta para realizar los ajustes pertinentes para no afectar la relación A/C que por ende influye a la resistencia a la compresión.

Es importante destacar que recientes investigaciones sobre la influencia del tamaño máximo del agregado en la resistencia del concreto se concluyen que para concretos de alta resistencia, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor debe ser el tamaño del agregado para que la eficiencia del cemento sea mayor, y concretos de resistencia intermedia y baja, mientras mayor sea el tamaño del agregado, mayor es la eficiencia del cemento. Es decir que se debe poseer un agregado con un tamaño nominal por debajo de una pulgada para conseguir un concreto con mejor características.

Con respecto a las mezclas de cemento se observa que las poseen adición con 10% y 15% de ceniza volante tienen un menor tiempo de fraguado, el empleo de la cantidad de agua para obtener la consistencia normal debido a que para mayor presencia de ceniza, menor cantidad de agua a utilizar.

La permeabilidad se concluye que la ceniza contribuyó a la formación de poros ya que la mezcla no se tuvo presente la humedad presente en la ceniza lo que generó el impedimento de la salida del agua libre durante el proceso de fraguado lo que genera la aparición de burbujas de aire, y siendo el fraguado rápido a mayor grado de ceniza volante confirma la formación de poros en el concreto. Lo cual se puede apreciar con la velocidad del flujo capilar en los núcleos que para el concreto con 0% de ceniza volante fue de $2,06517E-09$ m/s y para concreto con el 15% fue significativamente mayor $7,91371E-09$ m/s.

La ceniza como porcentaje del cemento para la preparación de una mezcla de concreto, reducirían los impactos negativos generados por el inadecuado manejo de los residuos o material de desecho producido por el sector industrial y así contribuir a un aporte viable en el sector de la construcción.

RECOMENDACIONES

Este tipo de investigaciones resulta de suma importancia en el área de la ingeniería civil, contribuyendo a establecer nuevos criterios y parámetros en el desarrollo de concretos impermeables con la adición de ceniza volante como porcentaje del cemento, brindando un menor impacto ambiental y económico. Por lo que es necesario el constante estudio, llegando a ser una alternativas para zonas donde no existe cobertura de adictivos comerciales.

Considerando que se debe orientar a la conveniencia de seguir con los trabajos investigativos donde se implementa la utilización de ceniza volante como adición del cemento. Se recomienda a plantas productoras de cemento, sector constructor e instituciones universitarias, y demás entes relacionados con la ingeniería civil en el área de materiales constructivos, realizar el diseño de mezcla con agregados artificiales con tamaño nominal menor a una pulgada para que el concreto tenga una mayor densidad y prevenir la adición del 25% de más de cemento, así como trabajar con una arena que tenga un módulo de finura aceptable por el ICPC. Y buscar la implementación de estos concretos en estructuras que ameriten su uso, buscar el porcentaje óptimo de ceniza que permita la fabricación de concretos permeables que cumplan con las resistencias deseada, y así poder garantizar un mejor aprovechamiento de los residuos industriales, implementando un desarrollo ambiental y tecnológico del concreto.

También es importante tener en cuenta, que ciertos tipos de cementos que contiene ceniza volante muestran una gran capacidad para restringir la movilidad de los iones de cloruro, es decir, continuar con las investigaciones pertinentes a la verificación de la permeabilidad del concreto con adición de ceniza volante para los diferentes tipos de fluidos (agua, aire, vapor de agua) o sustancias agresivas disueltas en el agua, dado que la permeabilidad del concreto está asociada a la vulnerabilidad al ataque de muchas sustancias que pueden deteriorar las estructuras, debido a que se encuentran en condiciones expuestas al medio ambiente.

Se recomienda seguir trabajando proyectos de carácter investigativo, debido a que aportan al desarrollo profesional de los estudiantes, dado que ofrece un nuevo campo de desempeño, brindando aptitudes de intervenir en varias disciplinas científicas de la ingeniería civil.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Camacol. (2012). Capítulo 3 - Entorno técnico y tecnológico. En C. R. Cundinamarca, Caracterización del sector de la construcción. Bogotá: Camacol.
- Revista Semana. Especiales. [En Línea] <<http://www.semana.com/especiales/contaminacion/>> [Citado en 10 de diciembre de 2013].
- SANTAELLA, Luz Elena. Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. [En Línea] <<http://www.umng.edu.co/documents/63968/74796/10art6.pdf>> [Citado en 10 de diciembre de 2013].
- EBENSPERGER, Luis y TORRENT, Roberto. Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. [En Línea] <<http://www.scielo.cl/pdf/ric/v25n3/art03.pdf>> [Citado en 10 de diciembre de 2013].
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Comunicado de prensa. Producción nacional del cemento gris [En Línea]. <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/cp_cem_gris_oct13.pdf> [Citado en 10 de diciembre de 2013].
- GOMEZ, José Gabriel. Permeabilidad. Capítulo 2.6.6. pág. 53 [En Línea] <http://www.maestriaenconstrucciones.com.ec/archivos/JOSE-GABRIEL-GOMEZ_cementos.pdf> [Citado en 10 de diciembre de 2013].
- LORENZO GARCÍA, M. P., Influencia de dos tipos de Cenizas Volantes Españolas en la Microestructura y Durabilidad de la pasta de Cemento Portland Hidratado., Instituto Eduardo Torroja CSIC, Madrid (España), 1993.
- AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, 2010, Pág 327-363
- CASTRO RODRIGUEZ, Diana Catalina Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto [En Línea] <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/134788.pdf>> [Citado en 24 de febrero de 2014].

- SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Tecnología del concreto y del mortero* (2001) (Quinta ed.). Bogotá, Colombia: Bhandar. [Citado en 28 de Noviembre de 2014].
- Gutiérrez de López, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción* (2003). Manizales, Colombia: Universidad Nacional De Colombia. [Citado en 28 de Noviembre de 2014].
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (Colombia). Vicerrectoría de investigaciones. Técnica descripción del método microscopio electrónico de barrido (MEB) [En línea] <<https://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>> [Citado en 19 de Diciembre de 2014].
- Universidad Industrial de Santander. Catálogo Bibliográfico [En Línea]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=78471%20111> [Citado en 22 de febrero de 2014].
- ESTEVAN PADILLA, Tomás. Arqhys Arquitectura: Ajustes de mezclas de concreto [En línea] <<http://www.arqhys.com/construccion/ajustes-mezclas-concreto.html>> [Citado en 28 de Diciembre de 2014].
- Instituto nacional de vías. Normas técnicas INVIAS (INV-E-07). Ingeniería civil, caracterización de los agregados y cemento empleados en la construcción (2007).
- ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- ICONTEC INTERNACIONAL. Norma técnica colombiana NTC 4483. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua (1998).

ANEXOS

Anexo A, Caracterización de los agregados.

Figura 24, Índice de aplanamiento y alargamiento.



Fuente: Autor.

Figura 25, colorímetro ASTM C40 con la muestra de arena (Contenido de materia orgánica).



Fuente: Autor.

Figura 26, Medición del tiempo de fraguado.



Fuente: Autor.

Anexo B, Preparación de las mezclas de concreto.

Figura 27, Mezclas, fundida, desencofrado y falla del de concreto.



Fuente: Autor

Figura 28, Comprobación del Asentamiento de la muestra de concreto.



Fuente: Autor.

Anexo C, Preparación de los núcleos para la verificación de la permeabilidad.

Figura 29, extracción de los núcleos de concreto.



Fuente: Autor.

Figura 30, Adecuación de los núcleos para verificar la permeabilidad.



Fuente: Autor

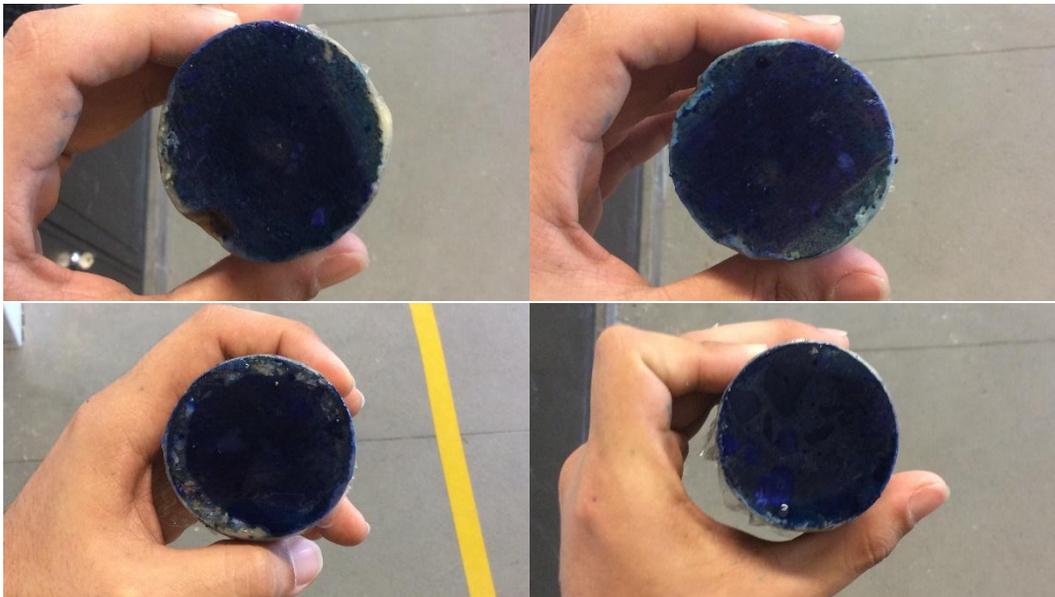
Anexo D, Muestras de verificación de la permeabilidad del concreto.

Figura 31, Absorción de agua para las muestras con 0% de ceniza volante.



Fuente: Autor.

Figura 32, Absorción de agua para las muestras con 5% de ceniza volante.



Fuente: Autor.

Figura 33, Absorción de agua para las muestras con 10% de ceniza volante.



Fuente: Autor.

Figura 34, Absorción de agua para las muestras con 15% de ceniza volante.



Fuente: Autor.