

**VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO DE 4000 PSI CON
ADICIONES DE CENIZA COMO PORCENTAJE DE CEMENTO**

ORLANDO DAVID IGUARÁN MAESTRE

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

2015

**VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO DE 4000 PSI CON
ADICIONES DE CENIZA COMO PORCENTAJE DE CEMENTO**

ORLANDO DAVID IGUARÁN MAESTRE

**TESIS DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Director (a):

MARIA FERNANDA SERRANO GUZMÁN

PhD. Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga. Enero de 2015.

AGRADECIMIENTOS

Hoy culmina una etapa que da inicio a otras, por ello quiero agradecer a Dios por haberme dado vida y salud para poder escalar otro peldaño más de los muchos que tengo propuesto trepar.

Muy agradecido viviré de todos y cada uno de las personas que integran la familia UPB, nuestra alma mater; especialmente de la doctora María Fernanda Serrano Guzmán por confiar en mí, por su tiempo, dirección y asistencia de todo el proyecto investigativo que aquí presentamos, así mismo quiero agradecer a todo el personal administrativo y laboratorista por su amplia y significativa labor y colaboración específicamente a Vicente Páez.

Finalmente a todas aquellas personas que me acompañaron en todo el proceso académico y que directa o indirectamente fueron partícipes de este proyecto contribuyendo a que se pudiera culminar exitosamente.

¡Gracias!

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado culminado con gran esfuerzo, perseverancia y valentía especialmente a mis padres Iván Iguarán y Yanexi Maestre que con sacrificio se han esmerado y han logrado brindarme siempre lo mejor.

A ti madre

Por traerme al mundo, regalarme amor y amistad y estar siempre cuando te necesito, por escucharme y apoyarme cada día de mi vida.

A ti padre

Por haber confiado en mí, por ser paciente y haber sido el ejemplo de seriedad y responsabilidad, esa que hoy me tiene aquí de pie con la frente en alto.

A toda mi familia y amigos por ser la fuente que me impulsaba cada día a seguir adelante, a no desfallecer por más difíciles que fueran los obstáculos.

A la memoria de mi abuela Carmen Magdaniel por todos esos años que Dios nos permitió disfrutar de su alegría y manera de ver la vida desde una perspectiva diferente, que aunque no está en este mundo terrenal sé que en el cielo está feliz y dichosa sabiendo que logré obtener este título.

Finalmente a todas las personas que en el avance de este proceso académico me acompañaron y aportaron su granito de arena para que yo hiciera posible lo que al principio fue una idea, que mutó a un sueño y que gracias a todos he podido hacer realidad.

¡Gracias!

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.2	ALCANCE	12
1.3	JUSTIFICACIÓN	13
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	OBJETIVO GENERAL	14
1.4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
1.5	RELEVANCIA DEL ESTUDIO	15
1.6	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	15
2	MARCO TEÓRICO	16
2.1	CONCRETO	16
2.1.1	CEMENTO	17
2.1.2	AGREGADOS	19
2.1.3	AGUA	20
2.1.4	CENIZA VOLANTE	20
2.2	CONCRETOS CON ADICIONES DE CENIZA VOLANTE	22
2.2.1	DURABILIDAD	22
2.2.2	TRABAJABILIDAD	22
2.2.3	PERMEABILIDAD	22
2.2.4	RESISTENCIA MECÁNICA	23
2.2.5	CALOR DE HIDRATACIÓN	23
2.3	CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO	24
2.3.1	RELACIÓN ENTRE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD	24
3	METODOLOGÍA	27
3.1	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	27
3.1.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (INV.E-213)	27
3.1.2	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS (INV.E-223)	28
3.1.3	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (INV.E-222)	29
3.1.4	DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS (INV.E-217)	29

3.1.5	RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS TAMAÑOS MENORES DE 112" POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV.E-218)	30
3.1.6	DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO (INV.E-307)	30
3.1.7	CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO (INV.E-310)	31
3.1.8	TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MÉTODO DEL APARATO DE VICAT (INV.E-305)	31
3.1.9	ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV.E-230)	32
3.1.10	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (INV.E-227)	32
3.1.11	HUMEDAD NATURAL DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (INV.E-122)	32
3.2	ELABORACION DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO	32
3.3	VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN	33
3.4	PERMEABILIDAD EN CONCRETOS	34
4	RESULTADOS	35
4.1	GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO	35
4.2	GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO	36
4.3	HUMEDAD NATURAL DE AGREGADOS	37
4.4	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA	38
4.5	CONSISTENCIA DEL CEMENTO	38
4.6	TIEMPOS DE FRAGUADO	39
4.7	DENSIDAD DEL CEMENTO	42
4.8	CARAS FRACTURADAS	42
4.9	ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO	43
4.10	DESGASTE	43
4.11	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS	44
4.12	MASA UNITARIA Y PORCENTAJE DE VACÍOS	45
4.13	RELACIÓN DE VACÍOS	45
4.14	ANÁLISIS FISICO - QUIMICO DE LA CENIZA	47
4.15	PARÁMETROS DE DISEÑO DE MEZCLAS	49
4.15.1	ASENTAMIENTO	49
4.15.2	TAMAÑO DEL AGREGADO	49
4.16	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	50
4.17	PERMEABILIDAD EN CONCRETOS	51

4.17.1	MEZCLA CON 0% DE CENIZA	54
4.17.2	MEZCLA CON 5% DE CENIZA	57
4.17.3	MEZCLA CON 10% DE CENIZA	60
4.17.4	MEZCLA CON 15% DE CENIZA	63
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
5.1	DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA Y FINAL.....	66
5.2	AGREGADOS	66
5.3	CEMENTO.....	67
5.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	67
5.5	PERMEABILIDAD	67
6	CONCLUSIONES.....	69
7	RECOMENDACIONES	70
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	71

Listado de Tablas

Tabla 1 Porosidad.....	26
Tabla 2 Granulometría de agregado grueso.....	35
Tabla 3 Granulometría de agregado fino.....	36
Tabla 4 Humedad natural de agregados finos.....	37
Tabla 5 Humedad natural de agregado grueso.....	37
Tabla 6 Consistencia del cemento.....	39
Tabla 7 Tiempo de fraguado 0%.....	39
Tabla 8 Tiempo de fraguado 5%.....	40
Tabla 9 Tiempo de fraguado 10%.....	40
Tabla 10 Tiempo de fraguado 15%.....	41
Tabla 11 Densidad del cemento.....	42
Tabla 12 Caras fracturadas.....	42
Tabla 13 Índice de aplanamiento.....	43
Tabla 14 Índice de alargamiento.....	43
Tabla 15 Desgaste.....	43
Tabla 16 Gravedad específica y absorción de finos.....	44
Tabla 17 Gravedad específica y absorción de grueso.....	44
Tabla 18 Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregado grueso.....	45
Tabla 19 Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregado fino.....	45
Tabla 20 Relación de vacíos.....	46
Tabla 21 Concentración química.....	48
Tabla 22 Resistencia a la compresión 0%.....	50
Tabla 23 Resistencia a la compresión 5%.....	50
Tabla 24 Resistencia a la compresión 10%.....	50
Tabla 25 Resistencia a la compresión 15%.....	50
Tabla 26 Permeabilidad 0% M1.....	54
Tabla 27 Permeabilidad 0% M2.....	54
Tabla 28 Permeabilidad 0% M3.....	55
Tabla 29 Permeabilidad 0% M4.....	56
Tabla 30 Permeabilidad 5% M5.....	57
Tabla 31 Permeabilidad 5% M6.....	57
Tabla 32 Permeabilidad 5% M7.....	58
Tabla 33 Permeabilidad 5% M8.....	58
Tabla 34 Permeabilidad 10% M9.....	60
Tabla 35 Permeabilidad 10% M10.....	60
Tabla 36 Permeabilidad 10% M11.....	61
Tabla 37 Permeabilidad 10% M12.....	61
Tabla 38 Permeabilidad 15% M13.....	63
Tabla 39 Permeabilidad 15% M14.....	63
Tabla 40 Permeabilidad 15% M15.....	64

Tabla 41 Permeabilidad 15% M16 65

Listado de Figuras

Figura 1 Porosidad	25
Figura 2 Diagrama de flujo	27
Figura 3 Granulometría	28
Figura 4 Gravedad específica de agregado grueso	28
Figura 5 Gravedad específica de agregado fino	29
Figura 6 Desgaste	30
Figura 7 Densidad del cemento	31
Figura 8 Elaboración de probetas	33
Figura 9 Resistencia a la compresión	33
Figura 10 Aplicación del método	34
Figura 12 Granulometría de agregado grueso	35
Figura 13 Granulometría de agregado fino	37
Figura 13 Contenido de materia orgánica	38
Figura 14 Desgaste	44
Figura 16 Menor porcentaje de vacío	46
Figura 16 Microscopía de la muestra	47
Figura 17 Concentración química	48
Figura 18 Asentamiento	49
Figura 19 Extracción de núcleos	51
Figura 20 Núcleos	52
Figura 21 Núcleos extraídos	52
Figura 22 Toma de medidas	53
Figura 23 Toma de medidas	53
Figura 24 Permeabilidad 0%	56
Figura 25 Permeabilidad 5%	59
Figura 26 Permeabilidad 10%	62
Figura 27 Permeabilidad 15% ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
Figura 28 Variación de la permeabilidad	68

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: VERIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO DE 4000 PSI CON ADICIONES DE CENIZA COMO PORCENTAJE DE CEMENTO

AUTOR(ES): Orlando David Iguarán Maestre

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Industrial

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

RESUMEN

La desorción de los lodos que se producen en la industria de hidrocarburos está generando grandes contaminaciones ambientales y atentados contra la salud de los seres vivos; es por ello que buscando mitigar y solucionar la problemática que se presenta por la explotación de los combustibles fósiles y aplicando ésta en un contexto se ha desarrollado esta investigación. La amplia demanda de concreto ha elevado el uso de los recursos naturales que forman parte del conglomerado (Arena, grava, agua y cemento), por lo tanto utilizando la posibilidad de uso de ceniza originada en las locaciones petroleras como porcentaje de cemento (5%, 10% y 15%) aporta en la disminución del consumo de agregados pétreos o cemento, contribuyendo al medio ambiente. Para viabilizar el uso de la ceniza, en este estudio se elaboraron 192 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto en concreto ajustado a 4000 Psi. Posteriormente, se extrajeron 16 núcleos cilíndricos (4 para cada diseño) para evaluar el comportamiento permeable de cada una de las mezclas. Tras finalizar el ensayo de permeabilidad y analizar el comportamiento permeable de cada uno de los núcleos ensayados se concluye que el uso de ceniza de locaciones petroleras como porcentaje de cemento en los diferentes porcentajes trabajados no fortalece la oposición de la mezcla al paso del agua.

PALABRAS CLAVES:

Mezcla, Concreto, Ceniza, Permeabilidad

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: VERIFICATION OF PERMEABILITY OF CONCRETE WITH ADDITIONS 4000 PSI ASH AS A PERCENTAGE OF CEMENT

AUTHOR(S): Orlando David Iguarán Maestre

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ph.D. Maria Fernanda Serrano Guzman

ABSTRACT

The desorption of sludge produced in the hydrocarbon industry is causing major environmental pollution and attacks on the health of living beings; is why looking mitigate and solve the problems presented by the exploitation of fossil fuels and applying it in a context has developed this research. The wide demand for concrete has increased the use of natural resources that are part of the cluster (sand, gravel, water and cement), thus using the usability of ash originated in oil leases as a percentage of cement (5% , 10% and 15%) contributes to the decreased consumption of stone aggregates and cement, contributing to the environment. To make possible the use of ash in this study 192 cylindrical specimens of 15 cm in diameter and 30 cm high set at 4000 Psi concrete were developed. Subsequently, cylindrical cores 16 (four for each design) were extracted permeable to evaluate behavior of each of the mixtures. Concluded after finishing the permeability test and analyze the behavior permeable each of the cores tested using ash from oil leases as a percentage of cement in different percentages worked not strengthen the opposition of the mixture to the passage of water.

KEYWORDS:

Mix, Concrete, Ash, Permeability

1. INTRODUCCIÓN

Explotar desmesuradamente para alcanzar los objetivos de producción proyectados anualmente es la prioridad de las empresas mineras que explotan minerales fósiles como el carbón y el petróleo, reconociendo que al mismo tiempo estas empresas tratan de contener y mitigar los efectos que causan los residuos inorgánicos producto de la exploración y combustión. Sin embargo, no resultan suficientes las acciones acometidas y es justo buscar un fin lógico y aplicable a los residuos que se generan en la industria, buscando aprovecharlos y logrando beneficios para la sociedad, el ambiente, las empresas y el sector en el cual estos residuos se vayan a emplear.

En este trabajo, el enfoque es hacia los desechos que se relacionan con la explotación de hidrocarburos, pues debido a las características intrínsecas que contienen las cenizas que allí se originan se convierten en un material cementante suplementario que permiten a la industria del concreto utilizar gran cantidad de estos subproductos que de no ser utilizados serían vertidos como desechos sin valor agregado.

La aplicación de cenizas volantes en la producción de concreto disminuye el consumo de cemento y le aportan a la mezcla propiedades mecánicas y de durabilidad. Los efectos de las cenizas volantes en el hormigón han sido estudiados en diferentes investigaciones, ya sea como reemplazo de parte del cemento portland o simplemente como adición en el hormigón. En el primer caso, que es mayoritario en estudios se ha comprobado que cuando se emplean las cenizas volantes en porcentaje de 10 a 30% de reemplazo, el agua necesaria para mezclado por unidad de volumen de hormigón generalmente no aumenta, y a veces puede ser reducida; que la resistencia en las primeras edades hasta los 28 días disminuye, pero en edades posteriores puede ser igual o mayor que el hormigón normal; los cambios de volumen no son lo significativamente afectados; se reducen el calor de hidratación y la permeabilidad; aumenta la cantidad de aditivo necesario para una determinada incorporación de aire. En el segundo caso, cuando se emplean las cenizas como adición en la mezcla se ha comprobado que en cantidades de 15 a 30% en peso de la arena, en concretos pobres se mejora significativamente la trabajabilidad y se obtienen mayores resistencias a todas las edades (Mauricio Ossa M, 1984).

Integrando la gran demanda que presenta la industria de la construcción y el problema que afronta la industria de hidrocarburo con las cenizas volantes y buscando soluciones costo-beneficio se planteó este trabajo grado en donde se utilizaron las cenizas inorgánicas como material cementante suplementario aprovechando las propiedades que le ofrece al concreto, buscando con ello ofrecer

una solución a la gran problemática ambiental y social que conduce la mala disposición de dichos residuos. Durante este estudio, se evaluó el comportamiento permeable que presenta una mezcla de 4000 Psi con adiciones de ceniza en 5%, 10% y 15% como porcentaje de cemento.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Colombia y el mundo entero están enfrentando una lucha propuesta por los agentes contaminantes como gases de industrias, polución vehicular e industrial entre otros que día tras día van aumentando su presencia en el medio ambiente. Estas diminutas partículas que en nuestro país son producidas con mayor concentración en el sector agrícola y en locaciones petroleras, representan un 38% y 37% de la contaminación total respectivamente (REVISTA SEMANA, 2012) problemática que afecta diariamente la salud humana causando insuficiencias respiratorias y demás a quienes están más expuestos a ellas.

Hoy la construcción está apuntando a ser sostenible, creando un entorno que no atente con el medio ambiente. La Construcción Sostenible se puede definir como aquella que teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente, resulta más saludable y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales. (CONSEJO DE LA CONSTRUCCIÓN VERDE, 2010)¹.

Debido a la creciente y amplia demanda que posee el concreto actualmente de manera cuantitativa y cualitativa hace que se planteen compromisos de ciencia y tecnología con la finalidad de emplear una serie de aditivos y agregados diferentes a los convencionales y así de mejorar las propiedades mecánicas y físicas del concreto, es por ello que tratando de mitigar la presencia de dichos agentes contaminantes en el ambiente, mejorando la salud humana y buscando enriquecer las propiedades de las mezclas de concreto, en este caso modificando el comportamiento con la adición de ceniza volante como porcentaje del cemento.

¹Ramírez Aurelio, Monografía “La Construcción Sostenible”. Madrid, España. 2010.

1.2 ALCANCE

Durante este estudio se realizará una mezcla de resistencia de 4000 Psi con diferentes porcentajes (5%, 10% y 15%) de ceniza como aditivo y se verificó la incidencia de esta adición en el porcentaje de vacíos y en la permeabilidad de la mezcla final. Se plantea un porcentaje recomendable de ceniza volante que se podría utilizar como aditivo en el conglomerado, complementando alguno de los materiales que integra la matriz principal de la mezcla, en este caso el cemento por ceniza, logrando con el acoplamiento de los elementos sin afectar la resistencia y la durabilidad frente al comportamiento de un concreto fabricado en condiciones normales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La industria de la construcción es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y las características del concreto. Actualmente la mayoría de las mezclas de concreto contienen también materiales cementantes suplementarios como porcentaje de alguno de los elementos de la matriz principal mejorando del desempeño de la mezcla en su estado fresco y endurecido².

Los minerales cementantes más conocidos y utilizados como suplemento de un porcentaje de la mezcla son ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales. Estos minerales son producidos generalmente en las plantas en donde se utilizan o se explotan combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). El continuo uso de minerales cementantes originados en mayor concentración en las industrias disminuye notablemente el impacto que estos generan en el ambiente. Además se ha comprobado que el uso de ceniza volante en la mezcla de concreto mejora la resistencia, durabilidad y manejabilidad.

Aplicando esto directamente al contexto nacional, se encuentra que Colombia es un país que construye en su gran mayoría a base de concreto, y la variedad climática conformada por periodos de viento-humedad, lluvias y sequias sugiere el uso de un material de baja permeabilidad y alta durabilidad. Es por esas razones anteriormente expuestas que se analizará el comportamiento permeable que presentará una mezcla modificada con ceniza volante como porcentaje de cemento fomentando además el desarrollo sostenible de las construcciones de la nación.

El interés de este trabajo surge ante la problemática de ECOPETROL por la sobreproducción de ceniza proveniente de los procesos de desorción térmica de las aguas de explotación, enmarcando el proyecto en el convenio AC 02 ICP 5211508 para la búsqueda de soluciones viables de aprovechamiento de la ceniza.

² Cifuentes Álvaro y Ferrer Carlos I. "Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de termopaipa". Bucaramanga, Santander, 2006. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil [en línea] <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1751/2/119942.pdf>> [Citado el 12 de Agosto de 2014]

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto en la permeabilidad de concretos de 4000 PSI preparados con ceniza volante añadida como porcentaje de cemento.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer un procedimiento para determinación de permeabilidad del concreto.
- Verificar la permeabilidad de una mezcla de concreto preparada con agregados convencionales.
- Comparar la variación de permeabilidad de un concreto preparado con agregado convencional y del concreto preparado con agregado convencional y ceniza añadida como porcentaje del cemento.

1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO

Se destaca del trabajo, la importancia del aprovechamiento de los residuos que se producen dentro de las diversas actividades de este sector económico, en este caso en particular del uso de la ceniza proveniente de desorción de lodos de locaciones petroleras.

1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Este documento está integrado por ocho (8) capítulos en donde se relaciona todo lo pertinente al estudio, investigación, resultados y conclusiones, a continuación se detallará cada uno de los capítulos que conforman el libro:

- Primer Capítulo: Es la parte introductoria de la investigación.
- Segundo Capítulo: Relaciona todo el argumento teórico de la temática del estudio.
- Tercer Capítulo: Detalla la metodología utilizada para llevar a cabalidad la investigación.
- Cuarto Capítulo: Resultados.
- Quinto Capítulo: Análisis de resultados.
- Sexto Capítulo: Conclusiones.
- Séptimo Capítulo: Recomendaciones.
- Octavo Capítulo: Referencias bibliográficas.

2 MARCO TEÓRICO

El concreto es un material que tiene una gran aplicabilidad en diferentes tipos de elementos estructurales y no estructurales. Para abordar la temática de este estudio, se presenta el fundamento teórico de todos los elementos que conforman la mezcla, iniciando con la historia del cemento y su clasificación, seguido por los materiales granulares (arena y grava), el agua y concluyendo con la ceniza volante que se utilizará como esencia del estudio. (PACHON & JARAMILLO, 2006)

2.1 CONCRETO

El concreto es un conglomerado pétreo artificial de uso común o convencional que se produce mediante la mezcla de tres ingredientes esenciales, cemento, agua y agregados. La mezcla íntima de los componentes del concreto produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad que se va perdiendo con el transcurrir del tiempo adquiriendo el comportamiento y las propiedades de un cuerpo sólido.

La mezcla de concreto tiene una transición de estado plástico a estado sólido, mientras trasciende la pasta de cemento actúa como lubricante de los agregados, proporcionando la fluidez necesaria para el adecuado manejo y disposición. Cuando la mezcla ya ha fraguado, la pasta cierra los espacios entre las partículas de concreto reduciendo la permeabilidad y evitando que el agua se desplace dentro del mampuesto. Al mismo tiempo la pasta fraguada y endurecida conjunta con los agregados suministra resistencia mecánica a compresión.

Las características de las mezclas pueden ser modificadas utilizando aditivos y adiciones de algún otro material suplementario que hacen que la mezcla acelere el proceso de endurecimiento, retarde el tiempo de fraguado, colorantes e impermeabilizantes. El concreto siendo el material más usado estructuralmente por el hombre para diversas actividades no para de buscar mejoras, por esta razón para la elaboración de concretos en la actualidad se les adiciona una gran variedad de subproductos de origen natural o industrial como cenizas volantes, escoria de alto humo, humo de sílice y puzolanas naturales como meta caolín, arcillas o esquistos calcinados y cristales volcánicos.³

³Gómez Galvis Fredy A y Morales Torra Wilmer M. "Evaluación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de concreto preparado con altos volúmenes de ceniza proveniente de locaciones petroleras". Bucaramanga, Santander 2013. Trabajo de Grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. [citado el 19 de agosto de 2014].

2.1.1 CEMENTO

El cemento es un material formado por la piedra caliza y materiales arcillosos con contenido de alúmina y sílice. La producción de cemento se realiza en plantas cementeras provistas de hornos, bajo estrictos controles de calidad para garantizar un producto final acorde con las especificaciones técnicas.

El cemento es una mezcla conglomerada que amasada con agua forma una pasta dura formando un nuevo producto hidratado resistente tanto al aire como al agua. Portland siendo uno de los principales actores de la elaboración de concreto. Este se puede llegar a manipular a altas temperaturas dando como resultado el Clinker.⁴

El cemento es el ingrediente principal del concreto y la sustancia que le da su propiedad adhesiva. Es un polvo fino gris resultado de un proceso de transformación de calizas y arcillas sometidas a altas temperaturas, cemento además tiene la capacidad de adherencia y cohesión las cuales permiten unir partículas sueltas que naturalmente unida una con otra no tienen cohesión alguna el tipo de cemento más usado es el Portland el cual tiene propiedades de adhesión y cohesión que permiten aglutinar los agregados para formar el concreto.

Las propiedades dependen de: su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.⁵

2.1.1.1 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Al cambiar su composición química y sus propiedades físico-mecánicas, se pueden obtener características diferentes cuando se hidrata el cemento, dando lugar a diferentes tipos. Existen diferentes clasificaciones del cemento portland que dependen del origen de la normalización. En nuestro país según la norma NTC 30 que está basada en las normas ASTM de los Estados Unidos presenta la siguiente clasificación y nomenclatura.

➤ **Cemento Portland tipo 1.**

Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.

⁴ SUÁREZ SILGADO, Sindy Sofía. Mezclas binarias y ternarias basadas en ceniza volante. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas. Barcelona, 2010, 99 h. Tesis de Master (Máster en Ingeniería Ambiental). Universidad politécnica de Cataluña. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I.

⁵ Sánchez de Guzmán Diego. Tecnología y propiedades. 2da ed. Bogotá: ASOCRETO, 1997. P.13.

- Cemento Portland tipo 1-M.
Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales pero tienen resistencias superiores a las del tipo 1.
- Cemento Portland tipo 2.
Destinado para obras que estén expuestas a sulfatos y obras donde se requiera moderado calor de hidratación.
- Cemento Portland tipo 3.
Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
- Cemento Portland tipo 4.
Es el que desarrolla bajo calor de hidratación
- Cemento Portland tipo 5.
Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- Cemento Portland Blanco.
Se obtiene con materiales seleccionados que le confieren una coloración blanca.
- Cementos Portland con Incorporadores de Aire.
Aquellos a los que se le adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
- Cemento Portland tipo 1-A, 1-M-A, 2A y 3A.
Son los mismos tipos de cemento mencionados anteriormente con la diferencia que a estos se le adiciona un material incorporador de aire
- Otros Cementos Portland.
Además de los anteriores tipos de cementos mencionados que se manejan en Colombia también se utilizan los siguientes:
 - El Cemento portland de escoria de alto horno: mediante la pulverización conjunta de Clinker portland y escoria granulada finamente molida con adición de sulfato de calcio (yeso).
 - El Cemento portland puzolánico: por medio de la pulverización conjunta de clinker portland y puzolanas.

2.1.2 AGREGADOS

Los agregados para el concreto son de vital importancia, pues conforman entre el 70% - 80% de la mezcla en volumen y pueden ser definidos como aquellos materiales inertes que poseen una resistencia propia suficiente que no afectan ni perturban el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantizan una adherencia con la pasta de cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales.

- Agregados Naturales: Son todos aquellos que se encuentran directamente en la corteza terrestre producto de la meteorización física de las rocas metamórficas y sedimentarias tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas, gravas y cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Se puede utilizar su granulación natural o triturándolos mecánicamente según se requiera.
- Agregados Artificiales: Estos se generan a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, limadura de hierro y otros.

La principal razón por la cual se utilizan agregados como parte del conglomerado de concreto es que estos actúan como material de relleno haciendo más económica la mezcla; además la combinación de agregados con la pasta fraguada proporciona gran parte de la resistencia a compresión.

2.1.2.1 ARENA

La arena es un material granular fino (partículas menores a 4,75 mm) que se produce naturalmente y está compuesta de material rocoso fino y partículas minerales. Su composición presenta variaciones de acuerdo a su fuente natural.

2.1.2.2 GRAVA

Estos áridos son partículas granulares de material pretirió, es decir piedra de tamaño variable se puede originar por fragmentación de rocas de manera natural o mecánica son particulares con dimensiones superior a 4,75 mm.

2.1.3 AGUA

El agua es el elemento que posee la virtud de hacer que el cemento experimente sus reacciones durante el estado plástico, proceso de fraguado y el estado endurecido. El agua se clasifica según la etapa que esté desarrollando, es decir agua de mezclado y agua de curado.

La calidad del agua para la producción de concreto básicamente debe estar libre de ingredientes tales como, sedimentos, aceites y químicos perjudiciales que afecten el comportamiento y las propiedades de la mezcla.

2.1.3.1 AGUA DE MEZCLADO

Hace referencia a la cantidad de agua necesaria para mezclar un volumen de concreto y así producir una mezcla trabajable y fluida que confiera una buena lubricación entre la pasta y los agregados cuando la composición esté en estado fresco.

2.1.3.2 AGUA DE CURADO

Son las condiciones necesarias óptimas de humedad y temperatura para que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales, por lo tanto el agua de curado no es más que el agua adicional que se suministra para hidratar eficientemente el cemento.

El curado no solo influye en la resistencia final del concreto, si no que disminuye la permeabilidad y mejora la resistencia de la piel del concreto al ingreso de gases (CO_2 , O) elementos necesarios para despasivar el refuerzo y causar corrosión.⁶

2.1.4 CENIZA VOLANTE

Las cenizas volantes son polvos finos considerados residuos subproductos de los hornos que emplean carbón mineral como combustible y de la desorción de lodos acumulada. Estas cenizas se caracterizan por una fina distribución granulométrica

⁶Sika Colombia. Curado del Concreto. <En línea> [col.sika.com/dms/getdocument.get]. [citado el 02 de Septiembre del 2014].

de altos contenidos de aluminio y silicio, estas características varían según el origen, el grado de pulverización y el tipo de colectores aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción sus propiedades físicas y químicas presentan cierto rango de variación.

El uso de ceniza volante (Fly Ash) en el concreto añade beneficios que mejoran su desempeño durante el tiempo de servicio, una de las ventajas más importantes que posee una mezcla de concreto con ceniza volante es la baja permeabilidad.

2.1.4.1 CLASIFICACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE

Según la Norma de ASTM C618 (American Society for Testing and Materials), existen principalmente dos tipos de cenizas volantes y otras con menor propiedades.

- **Clase C:** Las cenizas volantes que se consideran en este grupo presentan propiedades cementíticas y puzolánicas, y en este caso de utilizarse como cemento, el contenido en cal no puede sobrepasar el 20%.
- **Clase F:** Son las cenizas volantes que tienen bajo contenido en cal y presentan propiedades puzolánicas.
- **Clase N:** puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias

NOTA: Las cenizas de Clase F se producen típicamente a partir de la quema de antracita o carbón bituminoso, pero también puede ser producido a partir de carbón sub-bituminoso y lignito. Cenizas volantes de clase C se produce típicamente a partir de la quema de lignito o carbón sub-bituminoso, y también puede ser producido a partir de antracita o carbón bituminoso. Clase C cenizas volantes tienen típicamente contenidos totales de calcio, expresado como óxido de calcio (CaO), que son más altos que los de clase F cenizas volantes.⁷

⁷ Norma ASTM C618.

2.2 CONCRETOS CON ADICIONES DE CENIZA VOLANTE

En las últimas décadas se han realizado esfuerzos para mejorar la calidad y durabilidad del concreto, desde su resistencia y fluidez. Paralelamente se busca incorporar la ceniza como parte porcentaje del cemento aprovechando los beneficios que esta le aporta a la mezcla tales como: durabilidad, trabajabilidad, densidad y sangrado, permeabilidad, la resistencia mecánica, calor de hidratación. (HEADWATERS RESOURCES, 2013)

2.2.1 DURABILIDAD

La durabilidad no es una propiedad propia de un material, es más bien una función que relaciona el rendimiento del mismo con su vida de servicio bajo diversas condiciones ambientales.

La ceniza volante se ha utilizado para obtener mayor durabilidad particularmente donde se requiere menor permeabilidad, mayor resistencia a los sulfatos y la reducción a la reacción álcali-agregados, pero la durabilidad va a depender de la calidad de la ceniza volante.

2.2.2 TRABAJABILIDAD

Aumentar o disminuir la facilidad de manipular la mezcla y así emplearla de la forma deseada, permitiendo que el conjunto de materiales pueda recubrir completamente las varillas de refuerzo u otros detalles que se relacionan con su colocación. Una propiedad única de la ceniza volante es la trabajabilidad que le aporta a la mezcla debido a la forma esférica de las partículas que hace que el concreto para acabados sea más fino y la fluidez sea más efectiva comparada con el concreto convencional. (UNIVERSIDAD DE SONORA, 2010)

2.2.3 PERMEABILIDAD

Se define como la cantidad de agua o alguna otra solución líquida que pasa a través de una masa de concreto; existen algunas medidas que se pueden utilizar para hacer que el concreto sea menos permeable, una de ellas es el uso de ceniza volante cuyo beneficio en efecto reduce la filtración de líquidos y sólidos finos en

estructuras de contención, aumenta la resistencia a los sulfatos de sodio y magnesio y aguas de depósitos con alta capacidad de absorción de cal, disminución de la corrosión del acero de refuerzo y la reducción sustancial de la fluorescencia en la superficie del concreto. (VÉLEZ, 2010)

2.2.4 RESISTENCIA MECÁNICA

El efecto que se produce en la resistencia mecánica del concreto depende de la calidad y la cantidad de ceniza utilizada, es decir que el uso de cenizas sin la finura apropiada puede provocar efectos indeseables en la resistencia del concreto alterando además la relación A/C del diseño de mezcla.

Si se cuenta con un proveedor de ceniza volante de buena calidad y uniformidad, entonces podrían producirse concretos con las siguientes propiedades:

- Incrementos en la resistencia a la flexión y compresión.
- Adecuada trabajabilidad y cohesividad para su colocación, compactación y acabado.
- Una larga durabilidad y un buen desempeño estructural en el tiempo de vida de la estructura.

2.2.5 CALOR DE HIDRATACIÓN

Se conoce como calor de hidratación a la cantidad de calor liberada por gramo de cemento deshidratado, la ausencia de espacios para la liberación de la energía producida evitan que la mezcla desarrolle la resistencia requerida. La presencia de ceniza volante en la mezcla disminuye el calor de hidratación que experimenta el cemento y evita que se reduzca el tiempo de fraguado.⁸

La variación de la temperatura desde el inicio del fraguado de la pasta hasta su endurecimiento es causa de contracciones que producen agrietamientos en las

⁸ “Concreto Elaborado con Ceniza Volante”. México. Artículo de Investigación. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capítulo3.pdf>> [citado el 09 de septiembre de 2014].

obras de construcción en la que se emplean grandes masas de hormigón o en estructuras donde se utilizan mezclas ricas en cemento.⁹

2.3 CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO

La pérdida de pH producto de la reacción entre el dióxido de carbono y la humedad que se encuentra en los poros del concreto convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, aleación que posee menor pH lo que genera la desprotección del acero de refuerzo ante la corrosión, protección que se obtiene inicialmente mediante la formación de una capa pasiva homogénea de óxido sobre la superficie del acero que está en contacto con el concreto fluido.

Un concreto bastante permeable aumenta la rapidez con la que se produce la carbonatación presentando mayor difusión de CO_2 . Opuesto a esto, un concreto poco permeable por el contrario le aporta resistencia a la fisuración reduciendo la migración de humedad desde y hacia el interior del concreto, reduciendo así la susceptibilidad al ataque de sulfatos y a otros agentes químicos nocivos.

2.3.1 RELACIÓN ENTRE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

Durante el proceso de fraguado del concreto la migración de agua va dejando una serie de vacíos o poros que se hacen importantes no solo por su tamaño y distribución si no por su conectividad.

La porosidad se puede clasificar de la siguiente manera:

- Porosidad Total: es la relación entre el volumen de poros y el volumen total de la muestra.
- Porosidad Abierta: hace referencia a los poros que están conectados con el exterior.
- Porosidad Permeable: formada por parte de la porosidad abierta que están conectados entre sí, permitiendo el paso de los fluidos al interior del concreto.

⁹ Sánchez de Rojas M. Isabel, Frías M. "Comportamiento Térmico de los Materiales Puzolanicos en la Hidratación del Cemento". Madrid, España. Artículo de Investigación. [En Línea] <<http://digital.csic.es/bitstream/10261/39903/1/0001.pdf>> [citado el 09 de septiembre de 2014].

- Porosidad Superficial en Fondo de Saco: corresponde a una parte de la porosidad abierta que no están conectados entre sí.
- Porosidad Cerrada: incluyen los poros no conectados con el exterior.

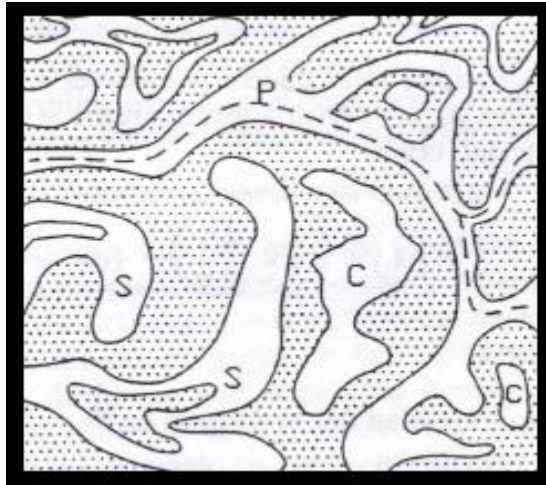



Figura 1 Porosidad
Fuente: (Gómez Cano, 2008)

P: Porosidad Permeable

C: Porosidad Cerrada

S: Porosidad Superficial de Fondo de Saco

 Pasta de Cemento

----- Posible recorrido del fluido

La porosidad además se clasifica según sea su origen:

- La estructura interna de los granos de cemento
- El aire que se incorpora en la mezcla de manera intencional
- La forma de los agregados y su estructura interna
- Asentamiento de la mezcla
- Transformaciones químicas
- Evaporación del agua que no hace parte de la hidratación (Gómez Cano, 2008)

La porosidad que se forma durante el acomodamiento de los agregados que componen la mezcla está fuertemente ligada a la calidad y durabilidad de los elementos construidos. En la tabla 1 se evalúa el comportamiento del concreto a partir de la proporción porosa presente en las estructuras

Tabla 1 Porosidad

% POROSIDAD TOTAL	OBSERVACIONES
≤ 10%	Indica un concreto de buena calidad y compacidad
10% - 15%	Concreto de moderada calidad
> 15%	Concreto de durabilidad inadecuada

3 METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolla es de tipo experimental puesto que es necesario realizar ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento permeable del concreto modificado con ceniza volante.

El proceso que se lleva a cabo está integrado por unas etapas que rigen el desarrollo de toda la investigación (Figura 2). Finalmente se elabora el respectivo informe con las conclusiones que arroja la investigación.

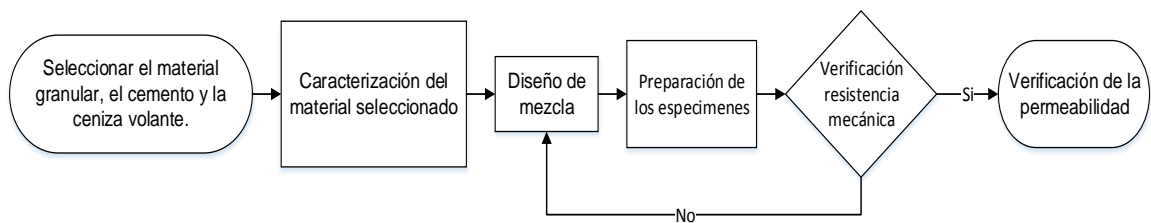


Figura 2 Diagrama de flujo

3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Para la preparación de las mezclas de concreto es necesaria la caracterización del material con el que se cuenta según los ensayos de laboratorio correspondientes para cemento, agregado grueso y agregado fino. Las prácticas de laboratorio se fundamentan en normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

3.1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (INV.E-213)

Este ensayo se emplea para conocer la distribución cuantitativa de las partículas de agregados grueso y fino del material que se utilizará para la producción de concreto, el ensayo se realiza haciendo pasar una muestra representativa de agregados previamente lavada y secada a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}C$ mediante tamices con aberturas progresivas decrecientes. En la figura 3 se aprecia la granulometría del agregado fino



Figura 3 Granulometría
Fuente: propia

3.1.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS (INV.E-223)

Este ensayo se emplea para determinar las gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente es la finalidad de este ensayo de laboratorio que se le practica a los agregados gruesos así como 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. Inmediatamente al proceso mencionado anteriormente se toman los datos necesarios y se determinan las gravedades mencionadas. A continuación en la figura 4 observamos la ejecución del ensayo.



Figura 4 Gravedad específica de agregado grueso
Fuente: propia

3.1.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (INV.E-222)

Mediante una muestra preparada de la misma manera que se hace para el agregado grueso se hace para el agregado fino. Luego del periodo de inmersión en agua de la muestra y posteriormente decantada con cuidado se esparce la misma sobre una superficie plana no absorbente en donde se seca superficialmente hasta que al introducir una parte de la muestra en el cono esta se mantenga parcialmente estable, inmediatamente ocurra esto se procede a verter dentro de un picnómetro con agua 500 g de agregado fino saturado y superficialmente seco hasta alcanzar el 90% de su capacidad (ver figura 5). En seguida se hace girar el picnómetro sobre un paño para sacar el aire atrapado, finalmente se procede a tomar las lecturas pertinentes para así realizar los cálculos correspondientes.



Figura 5 Gravedad específica de agregado fino
Fuente: propia

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS (INV.E-217)

Este ensayo se emplea para determinar las masas unitarias sueltas, compactas o una combinación de agregados es objeto de esta práctica de laboratorio que se le practica a los agregados. Se toman una muestra representativa que alcance a llenar el recipiente, para las masas unitarias sueltas solo se llena el recipiente con agregado grueso o fino, se enraza y se pesa. Las masas unitarias compactas se obtienen llenando el recipiente con tres capas de agregado y se compacta cada una con 25 golpes.

3.1.5 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV.E-218)

Este ensayo es un indicador de la calidad de los agregados pétreos con los que se cuenta. Se realiza mediante el uso de la máquina de los ángeles cuya esencia es un cilindro que gira sobre su propio eje a una velocidad constante y en la parte interior se le introducen unas esferas de acero que debido a las rotaciones desgastan la muestra. Luego de haber sometido la muestra a la carga abrasiva en la máquina de los ángeles observamos en la figura 6 el desgaste que tuvo al cabo de terminar el ensayo.



Figura 6 Desgaste

Fuente: propia

3.1.6 DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO (INV.E-307)

Se lleva a cabo mediante el uso de un frasco patrón de Le Chatelier, cemento portland y kerosene, elementos a los cuales se le conoce su peso y su densidad respectivamente. Inicialmente se llena el frasco de Le Chatelier con kerosene entre 0 y 1 ml como lo estipula la norma, inmediatamente se limpian las paredes del frasco para evitar que el cemento se adhiera a las paredes y se procede a verter el cemento dentro del frasco, al finalizar se toma la lectura final del menisco y se hacen los cálculos pertinentes.



Figura 7 Densidad del cemento
Fuente: propia

3.1.7 CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO (INV.E-310)

Este ensayo se emplea para encontrar la cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento de consistencia normal, consiste en mezclar 650 g de cemento con una cantidad de agua conocida, se llena el molde del aparato de vicat y se enrasa, se ubica el vástago del aparato en el centro de la pasta tocando su superficie inmediatamente se deja caer el vástago hasta que penetre la pasta por un lapso de tiempo no mayor a 30 segundos. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando el vástago penetra $10 \pm 1 \text{ mm}$ bajo la superficie 30 segundos después de haber sido soltado.

3.1.8 TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MÉTODO DEL APARATO DE VICAT (INV.E-305)

Se prepara una pasta con 500 g de cemento y se mezcla con agua, cantidad que se encontró en la práctica de consistencia normal del cemento, se moldea, se introduce en el molde y se enrasa, luego se deben hacer lecturas cada 15 minutos hasta que la aguja del aparato de vicat penetre 25 mm o menos.

3.1.9 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV.E-230)

Se selecciona una muestra previamente analizada granulométricamente y se separan las cantidades retenidas en los tamices No 3/4", 1/2", 3/8" y 1/4" luego siguiendo el procedimiento descrito en la norma anteriormente citada el cual es diferente para cada caso. Se hace pasar cada partícula por su respectiva abertura del calibrador de aplanamiento registrando el peso de las que atravesaron el orificio; de la misma manera se repite el procedimiento anterior pero esta vez haciendo pasar las partículas por el calibrador de alargamiento y se anotan las masas de las partículas que no pudieron pasar por su concerniente abertura.

3.1.10 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (INV.E-227)

Inicialmente se debe tamizar la muestra a través del tamiz No 4 para eliminar las partículas cuyo tamaño sea menor a 4,75 mm, se lava el material y se seca, aunque en algunos casos no es necesario; se procede a chequear y separar las partículas según su textura y su forma, finalmente se pesa la cantidad de material que se obtuvo de cada grupo de material separado.

3.1.11 HUMEDAD NATURAL DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (INV.E-122)

Se inicia tomando una muestra representativa en su estado natural, se registra el peso de inicial de la misma el cual contiene el peso propio del agregado junto con el peso del agua, inmediatamente se ingresa la muestra al periodo de secado por un 24 horas a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, al finalizar este periodo se esperan unos cuantos minutos a que la muestra se enfríe y se procede a tomar la lectura final para realizar los cálculos pertinentes. (INVIAS, 2007)

3.2 ELABORACION DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO

Siguiendo cada uno de los parámetros expuestos por el Instituto Nacional de Vías en la norma (INV.E-402) para la adecuada elaboración, disposición y curado de las muestras de concreto se elaboraron los especímenes cilíndricos de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro. Las principales prescripciones en las que se enfoca dicha norma es el número de capas que se deben verter en las formaletas, el número de golpes por cada capa y la disposición de los elementos para su adecuado curado.



Figura 8 Elaboración de probetas
Fuente: propia

3.3 VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN

Durante el proceso de curado, se debe mantener un excelente control de calidad de la elaboración de la mezcla es el fundamento de la norma INVIAS (INV.E-410), encargada de regular la calidad de los resultados, teniendo en cuenta de que ellos dependen del tamaño y forma del espécimen, de la bachada, 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.



Figura 9 Resistencia a la compresión
Fuente: propia

3.4 PERMEABILIDAD EN CONCRETOS

Siguiendo el ensayo descrito por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en la norma (C1585-13) realizando significativas modificaciones para acoplar a nuestras condiciones y así mejorar la efectividad del ensayo para medir la velocidad de absorción del agua por el concreto hidráulico. La modificación más relevante que se le realizó al método es la dimensión de los especímenes que se utilizarán para la ejecución del ensayo, se extrajeron cuatro núcleos de cada diseño de mezcla de cuya dimensión será de 5 cm de diámetro, así mismo se implementó el uso de un colorante en el agua para verificar el ascenso del agua.

La ejecución del ensayo se lleva a cabo mediante la inmersión de las muestras en un recipiente con agua hasta lograr que queden sumergidos 1 o 2 mm desde la superficie que se encuentra en contacto con el líquido, finalmente se toman los respectivos datos según los tiempos establecidos por la norma. La duración del ensayo es de aproximadamente 8 días en los cuales se espera que la variación del peso de los especímenes no difiera del peso inicial, pues se espera que la adición de ceniza como porcentaje de cemento disminuya la relación de infiltración del agua en el concreto, es decir que disminuya la permeabilidad evitando así el ingreso de agua en el espécimen así entonces desaparezcan en el concreto los problemas ocasionados por la presencia de agua en los elementos.



Figura 10 Aplicación del método
Fuente: propia

4 RESULTADOS

4.1 GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO

Mediante el análisis granulométrico presentados en la Tabla 2 se determina el tamaño máximo y máximo nominal del material granular grueso, dato necesario para el diseño de la mezcla.

Tabla 2 Granulometría de agregado grueso

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1 1/2"	38.1	0	0 %	0 %	100 %
1"	25,4	114	1,84 %	1,84 %	98,16 %
3/4"	19,05	1476	23,77 %	25,60 %	74,40 %
1/2"	12,7	2708	43,60 %	69,20 %	30,80 %
3/8"	9,525	1007,6	16,22 %	85,43 %	14,57 %
1/4"	6,35	905	14,57 %	100 %	0 %
		6210,6	100 %		

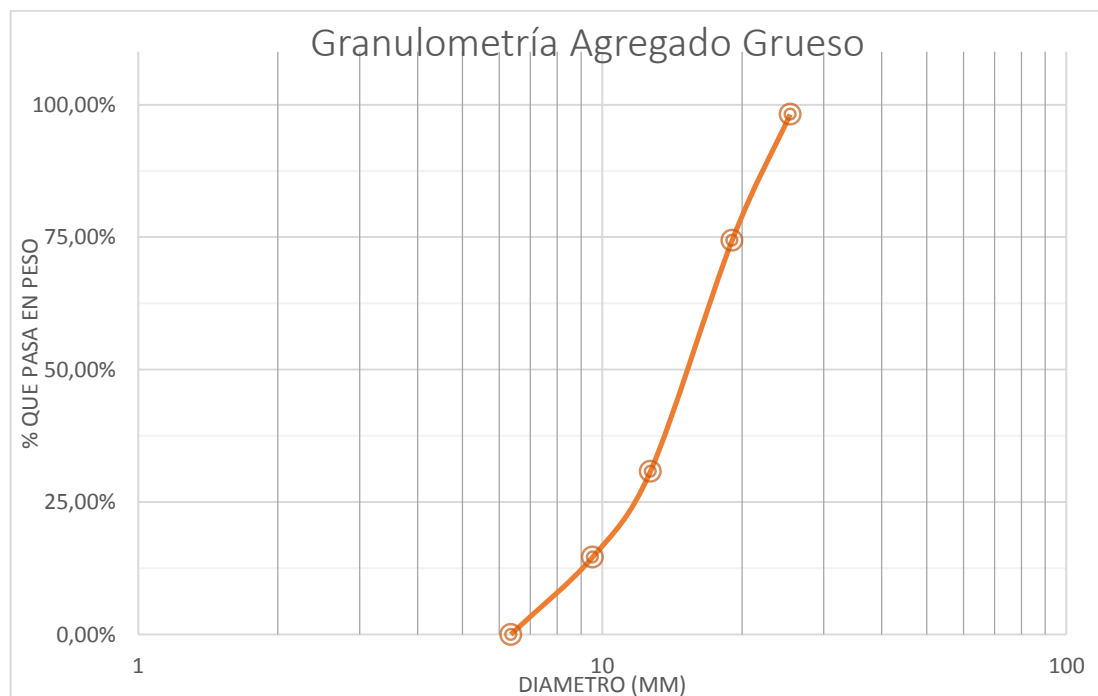


Figura 11 Granulometría de agregado grueso

4.2 GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO

Conocer el módulo de finura del agregado fino para así determinar si el material es el adecuado para elaborar la mezcla es el objeto de esta práctica de laboratorio, dicho módulo debe estar contemplado entre el rango permisible que varía de 2.70 a 3.50 (American Society for Testing Materials (ASTM), 1999). Todos los materiales granulares, en donde el módulo que esté por debajo del límite inferior o por encima del valor superior permisible son consideradas arenas demasiado finas y demasiado gruesas respectivamente.

Tabla 3 Granulometría de agregado fino

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
		0	0 %	0 %	100 %
No 4	4,75	286	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	0,6	581,4	22,37 %	73,21 %	26,79 %
No 50	0,3	421	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 %	0
		2598,6	100 %		

$$\text{Modulo de Finura} = \frac{11,01 + 23,50 + 50,84 + 73,21 + 89,41 + 94,27}{100} = 3,42$$

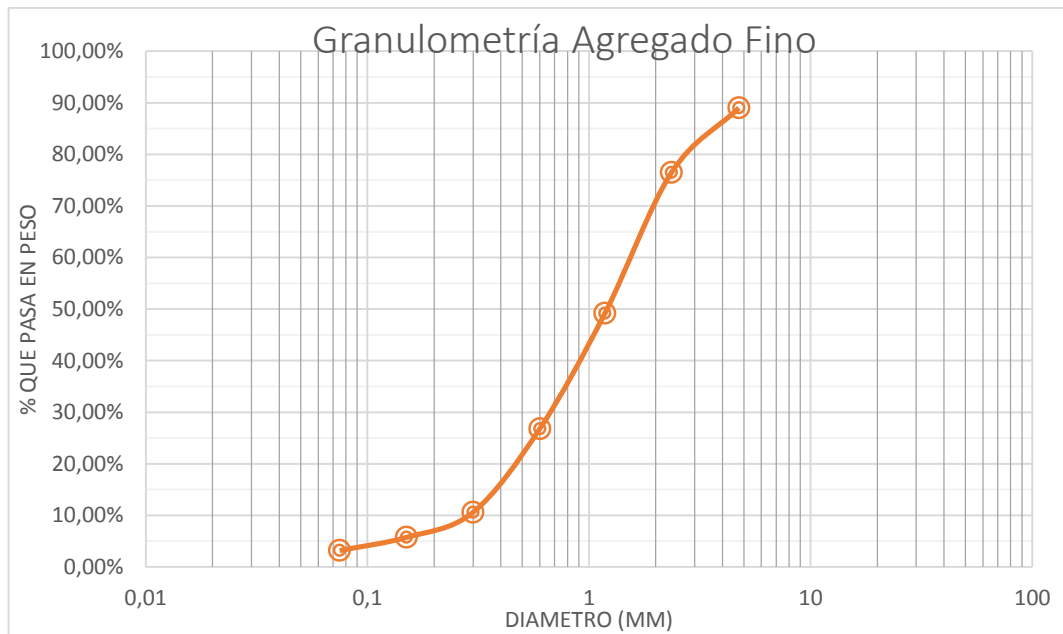


Figura 12 Granulometría de agregado fino

4.3 HUMEDAD NATURAL DE AGREGADOS

Evaluar la cantidad de agua presente en los agregados es de vital importancia para que pueda ser tenida en cuenta durante el diseño de la mezcla. Los resultados obtenidos están plasmados en la Tabla 4 y 5.

Tabla 4 Humedad natural de agregados finos

P. CAPSULA + SUELO HUMEDO	1304,8 g
P. CAPSULA + SUELO SECO	1263 g
PESO CAPSULA	188 g
HUMEDAD	3,89 %

Tabla 5 Humedad natural de agregado grueso

P. CAPSULA + SUELO HUMEDO	1189,4 g
P. CAPSULA + SUELO SECO	1176,6 g
PESO CAPSULA	59,4 g
HUMEDAD	1,15 %

4.4 CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA

El contenido de materia orgánica presente en el agregado fino es mínimo, por lo tanto no es perjudicial para la producción de concreto, su indicador es 1 (ver Figura 13) según las observaciones realizadas al cabo de 24 horas desde la preparación del ensayo.



Figura 13 Contenido de materia orgánica
Fuente: propia

4.5 CONSISTENCIA DEL CEMENTO

La consistencia del cemento hace referencia a la fluidez que tendrá la pasta de cemento durante la colocación de la mezcla, por consiguiente se analiza la cantidad de agua necesaria que requiere una cantidad de cemento para que posea un buen flujo. En la Tabla 6 presente a continuación se contemplan los resultados obtenidos para cada modificación (0%, 5%, 10% y 15%).

Tabla 6 Consistencia del cemento

TIPO DE MEZCLA	AGUA (ml)	PENETRACIÓN (mm)
CEMENTO + 0%	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	124	9
	123	8
	122	10

4.6 TIEMPOS DE FRAGUADO

A medida que pasa el tiempo la plasticidad de la pasta de cemento disminuye de manera gradual generando cambios en su comportamiento hasta tener un aspecto y comportamiento de un cuerpo sólido. Habiendo dicho esto entonces a continuación se presentan los resultados obtenidos para cada mezcla en las tablas de la 7 a la 10.

Tabla 7 Tiempo de fraguado 0%

TIEMPO DE FRAGUADO 0% DE CENIZA		
TIEMPO	PENETRACIÓN (mm)	TEMPERATURA °C
10:00	40	23
10:15	40	23
10:30	40	23
10:45	40	23
11:00	40	23
11:15	40	23
11:30	40	24
11:45	36	24
12:00	31	24
12:15	23	24
12:30	9	24

12:45	2	24
13:00	1	24
13:15	1	24
13:30	0	24

Tabla 8 Tiempo de fraguado 5%

TIEMPO DE FRAGUADO 5% DE CENIZA		
TIEMPO	PENETRACIÓN (mm)	TEMPERATURA °C
10:30	40	23
10:45	40	23
11:00	40	23
11:15	40	23
11:30	40	23
11:45	40	23
12:00	37	24
12:15	34	24
12:30	32	24
12:45	28	24
13:00	23	24
13:15	5	24
13:30	4	24
13:45	4	24
14:00	2	24
14:15	1	24
14:30	0	24

Tabla 9 Tiempo de fraguado 10%

TIEMPO DE FRAGUADO 10% DE CENIZA		
TIEMPO	PENETRACIÓN (mm)	TEMPERATURA °C
09:55	40	23
11:10	40	23
10:25	40	22
10:40	37	22
10:55	36	21
11:10	34	22
11:25	28	22
11:40	20	22
11:55	15	22
12:10	9	24
12:25	3	23

12:40	3	23
12:55	1	25
13:10	1	24
13:25	1	25
13:40	0,5	24
13:55	0,5	23
14:10	0	25

Tabla 10 Tiempo de fraguado 15%

TIEMPO DE FRAGUADO 15% DE CENIZA		
TIEMPO	PENETRACIÓN (mm)	TEMPERATURA °C
09:00	40	23
09:15	40	22
09:30	40	23
09:45	40	24
10:00	38	21
10:15	35	22
10:30	30	23
10:45	26	24
11:00	26	25
11:15	19	24
11:30	5	23
11:45	5	22
12:00	3	25
12:15	2	24
12:30	1	25
12:45	0,5	22
13:00	0	25

4.7 DENSIDAD DEL CEMENTO

La densidad del cemento es la relación que existe entre el peso por unidad de volumen, es un argumento necesario para el diseño de la mezcla de concreto. En la Tabla 11 se muestra la variación de la densidad respecto cada modificación con ceniza.

Tabla 11 Densidad del cemento

DENSIDAD DEL CEMENTO 0%	2,94 g/cm ³
DENSIDAD DEL CEMENTO 5%	2,81 g/cm ³
DENSIDAD DEL CEMENTO 10%	2,82 g/cm ³
DENSIDAD DEL CEMENTO 15%	2,78 g/cm ³

4.8 CARAS FRACTURADAS

La fractura de un gran porcentaje de agregados gruesos que componen la mezcla aumentan la resistencia al corte debido a que se incrementa la fricción entre una y otra partícula, por consiguiente mientras mayor sea el porcentaje de caras fracturadas mejor resistencia a la compresión poseerá la mezcla; en la Tabla 12 se relaciona el porcentaje de caras fracturadas presentes en nuestro material granular.

Tabla 12 Caras fracturadas

TAMIZ	FRACTURADAS	REDONDAS	TOTAL	PORCENTAJE FRACTURADO
1"	45,8	68,2	114	0,74
¾"	1286,8	189,2	1476	20,72
½"	2416,2	291,8	2708	38,90
3/8"	862,4	145,2	1007,6	13,89
¼"	831,6	73,4	905	13,39
TOTAL			6210,6	87,64

4.9 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO

La presencia de un gran grupo de partículas aplanadas y alargadas puede ser la causa de que el comportamiento de la mezcla no sea el óptimo, la presencia de partículas esbeltas puede provocar fallas en los elementos ocasionando un colapso de la estructura. Los datos obtenidos están relacionados en las tablas 13 y 14.

Tabla 13 Índice de aplanamiento

TAMIZ	MASA INICIAL (g)	APLANADAS	REDONDAS
1"	114	23,8	90,2
3/4"	1476	413,6	1062,4
1/2"	2708	469,8	2238,2
3/8"	1007,6	198,8	808,8
1/4"	905	139,8	765,2

Tabla 14 Índice de alargamiento

TAMIZ	MASA INICIAL (g)	ALARGAMIENTO	NO ALARGADAS
1"	114	0	114
3/4"	1476	203,6	1272,4
1/2"	2708	657	2051
3/8"	1007,6	287,2	720,4
1/4"	905	287,3	617,7

4.10 DESGASTE

La resistencia a la abrasión indica la durabilidad y resistencia que tendrá el concreto que elaboraremos, mientras menor sea el porcentaje de desgaste mejor comportamiento y resistencia aportarán las partículas gruesas a la mezcla. Las deducciones obtenidas están plasmadas en la tabla 15 presente a continuación.

Tabla 15 Desgaste

PESO INICIAL (g)	TAMIZ	PESO (g)	PESO FINAL (g)	DESGASTE (%)
5000	1/2"	2500	3223.8	64.46 %
	3/8"	2500		



Figura 14 Desgaste
Fuente: propia

4.11 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS

La gravedad específica y absorción de agregados es un análisis necesario que se le debe hacer a los agregados, con ello se determina la capacidad que tienen los materiales granulares pétreos de absorber agua, esta relación puede ser expresada de diferentes maneras como se muestra en la Tabla 16 y 17.

Tabla 16 Gravedad específica y absorción de finos

GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2.54
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA Y SUPERFICIALMENTE SECA	2.60
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2.71
ABSORCIÓN	2.42 %

Tabla 17 Gravedad específica y absorción de grueso

GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2.51
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA Y SUPERFICIALMENTE SECA	2.57
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2.67
ABSORCIÓN	2.5 %

4.12 MASA UNITARIA Y PORCENTAJE DE VACÍOS

El acomodamiento y ubicación de las partículas de agregado fino y grueso genera vacíos o presencia de aire que altera el volumen y resistencia de la mezcla. Existe una relación inversamente proporcional entre la resistencia y la cantidad de vacíos presentes entre los agregados, es decir que a mayor presencia de vacíos menor resistencia. Ver Tabla 18 y 19 en donde se contempla dicha relación para cada tipo de agregado.

Tabla 18 Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregado grueso

MASA UNITARIA SUELTA	1443.86 Kg/m ³
MASA UNITARIA COMPACTA	1525.75 Kg/m ³
% VACÍOS SUELTA	42.36 %
% VACÍOS COMPACTA	39.09 %

Tabla 19 Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregado fino

MASA UNITARIA SUELTA	1615.09 Kg/m ³
MASA UNITARIA COMPACTA	1706.24 Kg/m ³
% VACÍOS SUELTA	36.29 %
% VACÍOS COMPACTA	32.69 %

4.13 RELACIÓN DE VACÍOS

Se define como la relación que existe entre el peso de una cantidad de agregado y el volumen del recipiente en el cual se deposita, dicha relación puede ser suelta u compacta. Se analizaron varias combinaciones de agregados en diferentes porcentajes para así determinar qué proporción de cada tipo de agregado se debía agregar a la mezcla de concreto, conservando el principio de menor porcentaje de vacíos. Dichas combinaciones están expresadas en la Tabla 20 presente a continuación.

Tabla 20 Relación de vacíos

MEZCLA	MUESTRA	MUSCc	ARENA	GRAVA	PEC	% VACIOS
1	M3	1712,701	70	30	2,698	37 %
2	M4	1783,486	60	40	2,694	34 %
3	M5	1841,199	50	50	2,690	32 %
4	M6	1879,004	40	60	2,686	30 %
5	M7	1851,454	30	70	2,682	31 %
6	M8	1807,415	20	80	2,678	33 %

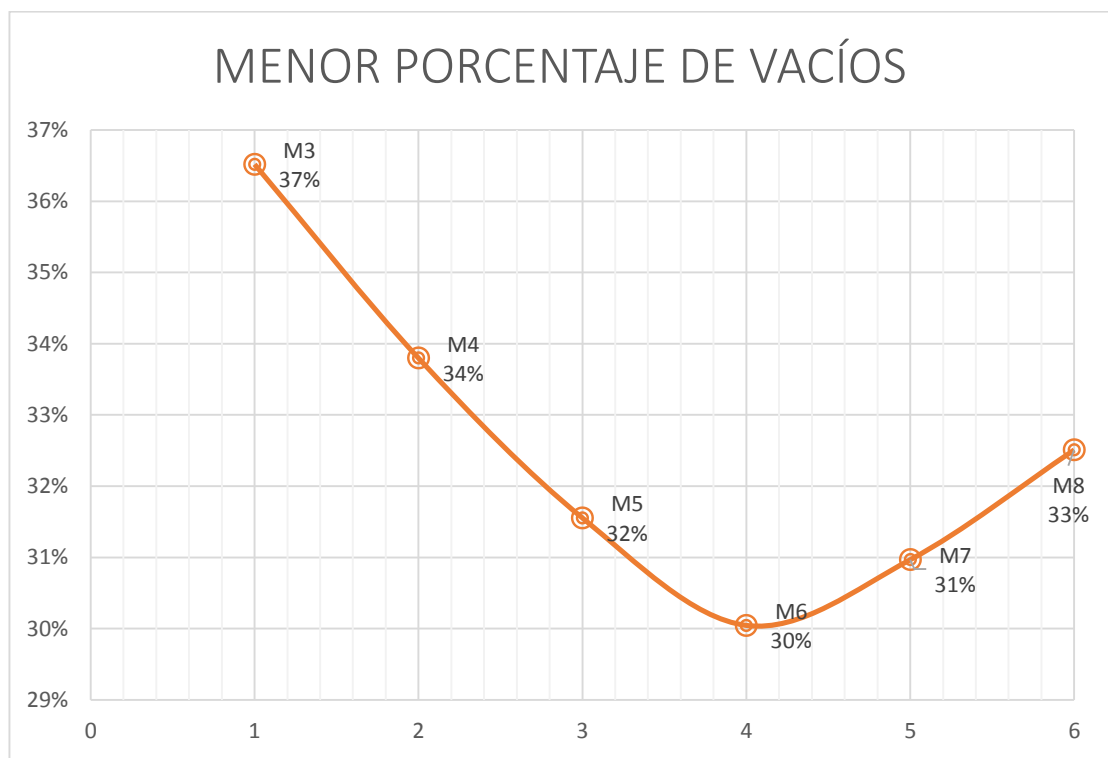


Figura 15 Menor porcentaje de vacío

4.14 ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO DE LA CENIZA

Se cuenta con una ceniza que está compuesta por una gran variedad de elementos, entre ellos Oxígeno (O), Silicio (Si), Magnesio (Mg) y Aluminio (Al) los cuales presentan mayor concentración en la estructura química de los residuos (ceniza) de las exploraciones petroleras. A continuación se presentan los resultados del análisis practicado que estuvo bajo la dirección del Geólogo Phd Carlos Alberto Ríos Reyes, jefe del laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

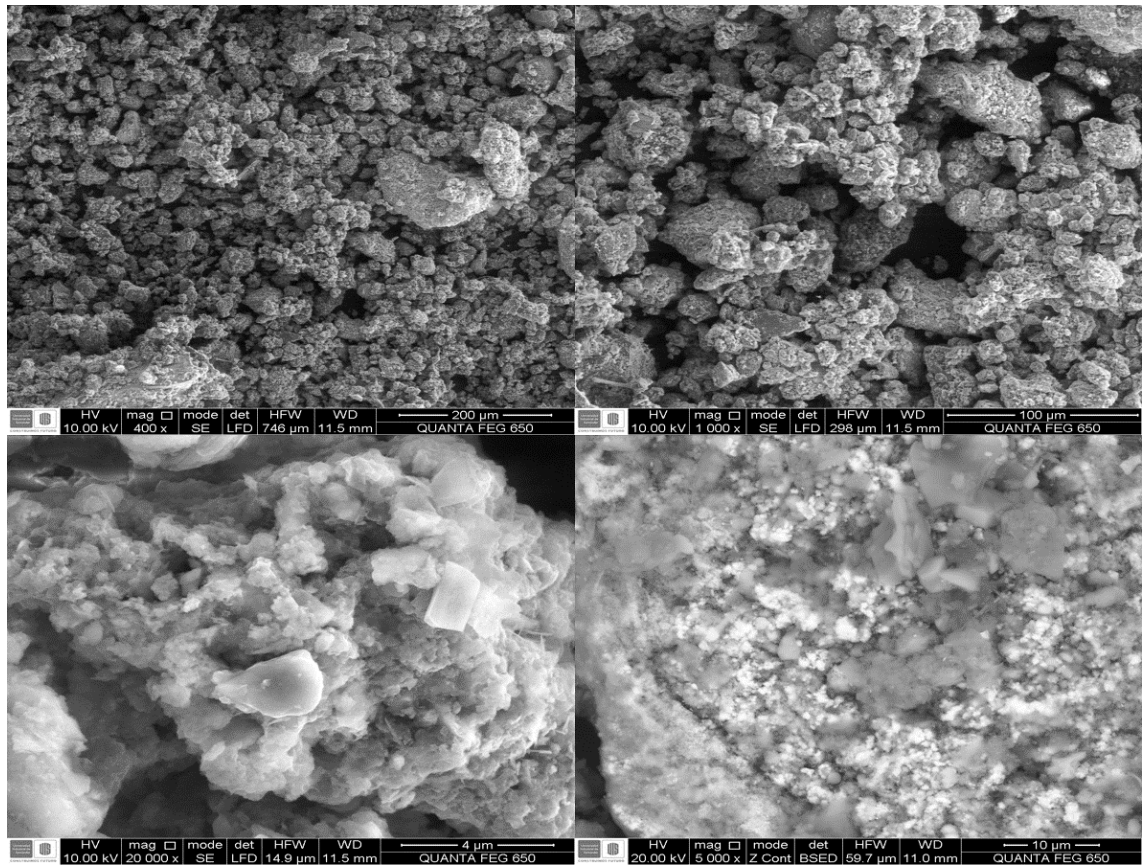


Figura 16 Microscopía de la muestra
Fuente: Análisis químico Lab UIS

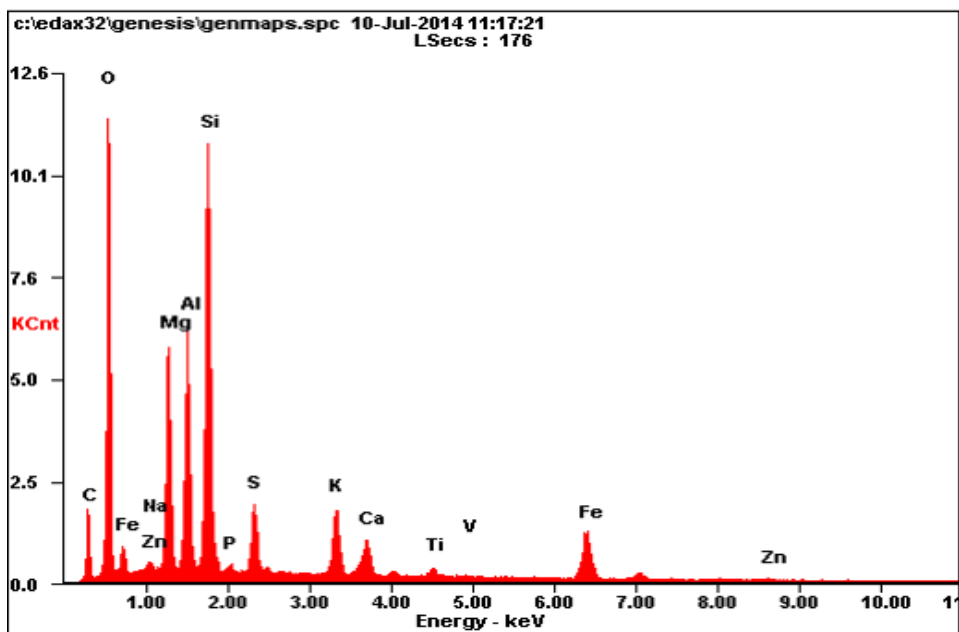


Figura 17 Concentración química
Fuente: Análisis químico Lab UIS

Tabla 21 Concentración química

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

4.15 PARÁMETROS DE DISEÑO DE MEZCLAS

Se trabajó la metodología de menor porcentaje de vacíos entre el agregado grueso y el fino basada en el Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC).

4.15.1 ASENTAMIENTO

Debido a que el asentamiento es una medida importante de la mezcla se seleccionó un asentamiento de 5 cm con una consistencia media y así obtener la fluidez y manejabilidad requerida sabiendo que mientras menor sea el asentamiento de la mezcla menor será la exudación y la segregación que experimentará la mezcla luego de haber sido colocada.



Figura 18 Asentamiento

Fuente: propia

4.15.2 TAMAÑO DEL AGREGADO

Según el análisis granulométrico de cada tipo de agregado, se contó con un agregado grueso que poseía un tamaño máximo y máximo nominal de $1\frac{1}{2}$ " y 1" respectivamente, mientras que para el agregado fino (arena) tenía un módulo de finura de 3.42. (ICPC, 1982)

4.16 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Es la capacidad que tienen las estructuras de concreto a resistir grandes esfuerzos; la resistencia de la mezcla depende de la calidad de los materiales con los cuales se cuenta, el porcentaje de vacíos y de la etapa de curado. A continuación (Tablas 21 a 24) se presentan los datos obtenidos tras ser fallados bajo una carga axial.

Tabla 22 Resistencia a la compresión 0%

MUESTRA	DIAMETRO (mm)		ALTURA (mm)		AREA (in ²)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (Psi)
1	150	151	303	306	27.573	600.26	4893.951
2	152	153	306	302	28.311	590.35	4687.735
3	154	154	302	304	28.871	610.75	4755.708

Tabla 23 Resistencia a la compresión 5%

MUESTRA	DIAMETRO (mm)		ALTURA (mm)		AREA (in ²)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (Psi)
1	154	154	304	304	28.871	568.25	4424.775
2	152	151	304	304	27.941	588.95	4738.556
3	156	155	306	304	29.436	557.41	4257.034

Tabla 24 Resistencia a la compresión 10%

MUESTRA	DIAMETRO (mm)		ALTURA (mm)		AREA (in ²)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (Psi)
1	152	152	300	300	28.126	530.76	4242.327
2	150	150	301	299	27.391	548.36	4500.662
3	152	152	305	306	28.126	560.16	4477.320

Tabla 25 Resistencia a la compresión 15%

MUESTRA	DIAMETRO (mm)		ALTURA (mm)		AREA (in ²)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (Psi)
1	153	153	300	300	28.497	520.03	4102.407
2	154	152	303	303	28.497	536.31	4230.836
3	157	157	297	296	30.006	568.12	4256.317

4.17 PERMEABILIDAD EN CONCRETOS

La permeabilidad es una propiedad que tienen los materiales para permitir el paso de agua a través de ellos, los elementos pueden ser muy permeables o poco permeables. En las estructuras de concreto especialmente aquellas que están en continuo contacto con agua o cualquier otro fluido lo ideal es utilizar concretos que posean una permeabilidad baja, es decir que se opongan la filtración del líquido.

Para evaluar el comportamiento permeable de cada una de las mezclas se sigue la ley de Darcy descrita en la norma (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2013) que se fundamenta en la velocidad con la que el agua logra penetrar los especímenes de concreto; a partir de la infiltración que presentan cada una de las muestras ensayadas fue posible determinar la permeabilidad aplicando la siguiente formula:

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

En donde:

I = Infiltración.

m_t = Cambio de peso del espécimen en gramos.

a = Area del espécimen en contacto con el agua en mm^2 .

d = densidad del agua en g/mm^3 .

A continuación se muestra el procedimiento para la ejecución del ensayo de permeabilidad:



Figura 19 Extracción de núcleos

Fuente: propia



Figura 20 Núcleos
Fuente: propia



Figura 21 Núcleos extraídos
Fuente: propia



Figura 22 Toma de medidas
Fuente: propia



Figura 23 Toma de medidas
Fuente: propia

4.17.1 MEZCLA CON 0% DE CENIZA

A continuación desde la Tabla 25 a la 40 se muestran tabulados los resultados obtenidos durante el proceso de aplicación del método.

Tabla 26 Permeabilidad 0% M1

1						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	314,103	0	0	0	
60	8	314,459	0,356	0,16607266	0,00016607	2,76788E-06
900	30	314,622	0,519	0,24216498	0,00024216	2,69072E-07
1800	42	314,759	0,656	0,30611987	0,00030612	1,70067E-07
3600	60	314,945	0,842	0,39294914	0,00039295	1,09153E-07
10920	104	315,313	1,210	0,56474039	0,00056474	5,17162E-08
12720	113	315,349	1,246	0,58154606	0,00058155	4,5719E-08
14520	120	315,368	1,265	0,59041572	0,00059042	4,06622E-08
16320	128	315,441	1,338	0,62449387	0,00062449	3,82656E-08
86880	295	316,366	2,26275	1,05630612	0,00105631	1,21582E-08
174720	418	317,124	3,02075	1,41015875	0,00141016	8,07096E-09
347520	590	318,063	3,95975	1,84850653	0,00184851	5,31914E-09
434520	659	318,452	4,34875	2,03010108	0,0020301	4,67205E-09
514440	717	318,711	4,60775	2,15100851	0,00215101	4,18126E-09
PROMEDIO						2,71303E-07

Tabla 27 Permeabilidad 0% M2

2						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	342,807	0	0	0	
60	8	343,130	0,324	0,15313607	0,00015314	2,55227E-06
900	30	343,259	0,453	0,21471836	0,00021472	2,38576E-07
1800	42	343,401	0,595	0,28291826	0,00028292	1,57177E-07
3600	60	343,544	0,738	0,32441998	0,00032442	9,01167E-08

10920	104	343,823	1,017	0,4846816	0,00048468	4,43848E-08
12720	113	343,881	1,075	0,4661425	0,00046614	3,66464E-08
14520	120	343,894	1,088	0,50864464	0,00050864	3,50306E-08
16320	128	343,926	1,120	0,5093577	0,00050936	3,12106E-08
86880	295	344,656	1,8495	0,86339108	0,00086339	9,93774E-09
174720	418	345,316	2,5095	1,18108692	0,00118109	6,75988E-09
347520	590	346,161	3,3545	1,5291424	0,00152914	4,40016E-09
434520	659	346,525	3,7185	1,69587322	0,00169587	3,90287E-09
514440	717	346,722	3,9155	1,80187997	0,00180188	3,5026E-09
PROMEDIO						2,47224E-07

Tabla 28 Permeabilidad 0% M3

3						
TIEMPO	VTIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	317,317	0	0	0	
60	8	317,875	0,558	0,2648984	0,0002649	4,41497E-06
900	30	318,129	0,812	0,38542539	0,00038543	4,2825E-07
1800	42	318,408	1,091	0,51781527	0,00051782	2,87675E-07
3600	60	318,635	1,318	0,62553034	0,00062553	1,73758E-07
10920	104	319,218	1,901	0,902173	0,00090217	8,26166E-08
12720	113	319,252	1,935	0,91830654	0,00091831	7,21939E-08
14520	120	319,276	1,959	0,92969491	0,00092969	6,40286E-08
16320	128	319,269	1,952	0,9263733	0,00092637	5,67631E-08
86880	295	320,246	2,92925	1,38997516	0,00138998	1,59988E-08
174720	418	320,865	3,54825	1,68370038	0,0016837	9,63656E-09
347520	590	321,616	4,29925	2,04006168	0,00204006	5,87034E-09
434520	659	321,906	4,58925	2,17767124	0,00217767	5,01167E-09
514440	717	322,136	4,81925	2,28680986	0,00228681	4,44524E-09
PROMEDIO						4,32402E-07

Tabla 29 Permeabilidad 0% M4

4						
TIEMPO	$\sqrt{\text{TIEMPO}}$	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S ^{1/2}	g	g	mm	m	m/s
0	0	323,729	0	0	0	
60	8	323,977	0,248	0,11814038	0,00011814	1,96901E-06
900	30	324,09	0,361	0,17191627	0,00017192	1,91018E-07
1800	42	324,234	0,505	0,24044483	0,00024044	1,3358E-07
3600	60	324,377	0,648	0,3084975	0,0003085	8,56937E-08
10920	104	324,715	0,986	0,46934926	0,00046935	4,29807E-08
12720	113	324,742	1,013	0,48219836	0,0004822	3,79087E-08
14520	120	324,779	1,050	0,4998064	0,00049981	3,44219E-08
16320	128	324,808	1,079	0,51360729	0,00051361	3,1471E-08
86880	295	325,689	1,96025	0,93286883	0,00093287	1,07374E-08
174720	418	326,264	2,53525	1,20650718	0,00120651	6,90538E-09
347520	590	327,079	3,35025	1,5943598	0,00159436	4,58782E-09
434520	659	327,309	3,58025	1,70381514	0,00170382	3,92114E-09
514440	717	327,569	3,84025	1,82754727	0,00182755	3,5525E-09
PROMEDIO						1,96599E-07

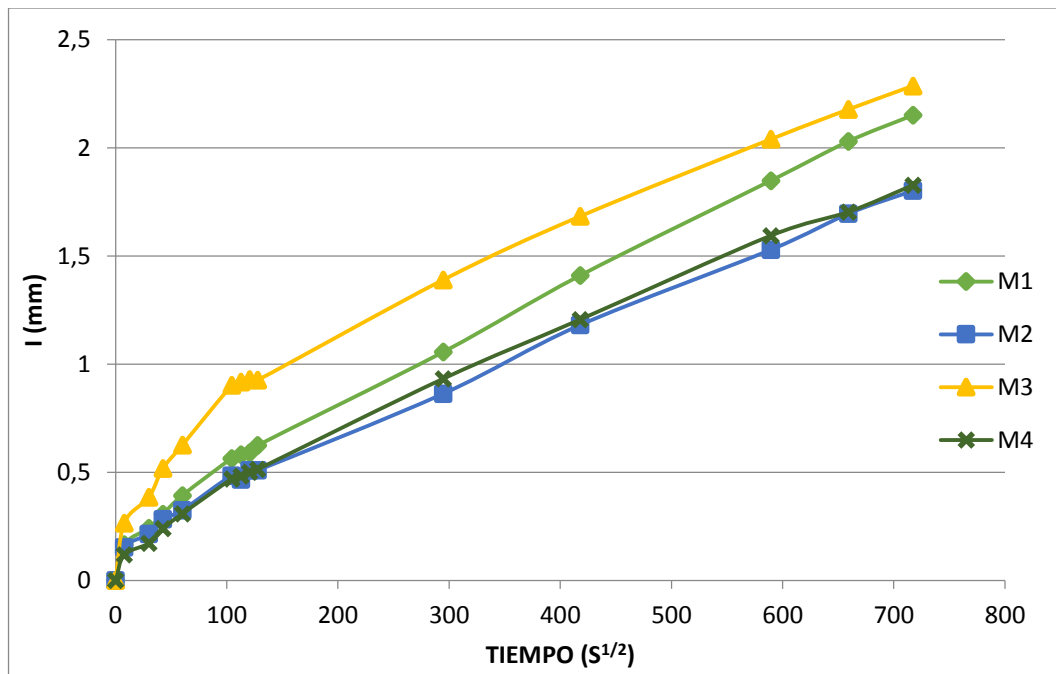


Figura 24 Permeabilidad 0%

4.17.2 MEZCLA CON 5% DE CENIZA

Tabla 30 Permeabilidad 5% M5

5						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	309,971	0	0	0	
60	8	310,383	0,412	0,18134527	0,00018135	3,02242E-06
900	30	310,619	0,648	0,28515966	0,00028516	3,16844E-07
1800	42	310,66	0,689	0,30319521	0,0003032	1,68442E-07
3600	60	310,838	0,867	0,3814959	0,0003815	1,05971E-07
10920	104	311,069	1,098	0,48311084	0,00048311	4,42409E-08
12720	113	311,134	1,163	0,51170378	0,0005117	4,02283E-08
14520	120	311,168	1,197	0,52666009	0,00052666	3,62714E-08
16320	128	311,219	1,248	0,54909456	0,00054909	3,36455E-08
86880	295	311,86	1,88925	0,83106501	0,00083107	9,56567E-09
174720	418	312,523	2,55225	1,12271307	0,00112271	6,42578E-09
347520	590	313,383	3,41225	1,50101976	0,00150102	4,31923E-09
434520	659	313,736	3,76525	1,65630146	0,0016563	3,8118E-09
514440	717	313,976	4,00525	1,76187542	0,00176188	3,42484E-09
PROMEDIO						2,9197E-07

Tabla 31 Permeabilidad 5% M6

6						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	305,527	0	0	0	
60	8	306,056	0,529	0,25211549	0,00025212	4,20192E-06
900	30	306,229	0,702	0,33460434	0,0003346	3,71783E-07
1800	42	306,414	0,887	0,42281496	0,00042281	2,34897E-07
3600	60	306,595	1,068	0,50911832	0,00050912	1,41422E-07
10920	104	306,969	1,442	0,68744682	0,00068745	6,2953E-08
12720	113	307,02	1,493	0,71176434	0,00071176	5,59563E-08
14520	120	307,042	1,515	0,72225426	0,00072225	4,9742E-08
16320	128	307,084	1,557	0,74228045	0,00074228	4,54829E-08

86880	295	307,85	2,32275	1,1075201	0,00110752	1,27477E-08
174720	418	308,412	2,88475	1,37548966	0,00137549	7,87254E-09
347520	590	309,128	3,60075	1,7168886	0,00171689	4,9404E-09
434520	659	309,517	3,98975	1,90236931	0,00190237	4,37809E-09
514440	717	309,643	4,11575	1,9624479	0,00196245	3,81473E-09
PROMEDIO						3,9984E-07

Tabla 32 Permeabilidad 5% M7

7						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	329,194	0	0	0	
60	8	329,824	0,631	0,27352522	0,00027353	4,55875E-06
900	30	330,268	1,075	0,4661425	0,00046614	5,17936E-07
1800	42	330,589	1,396	0,60539959	0,0006054	3,36333E-07
3600	60	331,244	2,051	0,88955346	0,00088955	2,47098E-07
10920	104	332,104	2,911	1,26264098	0,00126264	1,15626E-07
12720	113	332,247	3,054	1,32467763	0,00132468	1,04141E-07
14520	120	332,351	3,158	1,36979519	0,0013698	9,43385E-08
16320	128	332,583	3,390	1,47044206	0,00147044	9,01006E-08
86880	295	335,183	5,9895	2,5983811	0,00259838	2,99077E-08
174720	418	336,917	7,7235	3,35062967	0,00335063	1,91771E-08
347520	590	338,486	9,2925	4,03129749	0,0040313	1,16002E-08
434520	659	338,722	9,5285	4,13367965	0,00413368	9,51321E-09
514440	717	338,806	9,6125	4,17012076	0,00417012	8,10614E-09
PROMEDIO						4,7251E-07

Tabla 33 Permeabilidad 5% M8

8						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	306,718	0	0	0	
60	8	307,018	0,300	0,14019883	0,0001402	2,33665E-06

900	30	307,186	0,468	0,21877566	0,00021878	2,43084E-07
1800	42	307,361	0,643	0,30062652	0,00030063	1,67015E-07
3600	60	307,584	0,866	0,4049279	0,00040493	1,1248E-07
10920	104	307,992	1,274	0,59575734	0,00059576	5,45565E-08
12720	113	308,031	1,313	0,61399839	0,000614	4,82703E-08
14520	120	308,096	1,378	0,64440014	0,0006444	4,43802E-08
16320	128	308,104	1,386	0,64814189	0,00064814	3,97146E-08
86880	295	308,959	2,24075	1,04804181	0,00104804	1,20631E-08
174720	418	309,608	2,88975	1,35159157	0,00135159	7,73576E-09
347520	590	310,453	3,73475	1,7468143	0,00174681	5,02651E-09
434520	659	310,85	4,13175	1,93249883	0,0019325	4,44743E-09
514440	717	311,055	4,33675	2,02838126	0,00202838	3,94289E-09
PROMEDIO						2,36874E-07

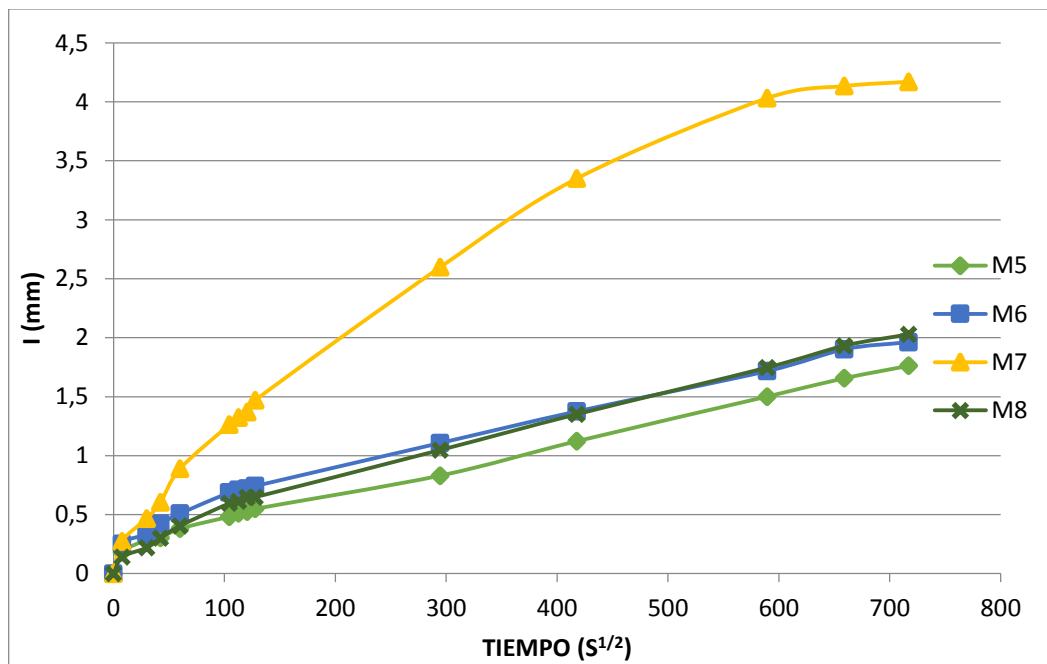


Figura 25 Permeabilidad 5%

4.17.3 MEZCLA CON 10% DE CENIZA

Tabla 34 Permeabilidad 10% M9

9						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	284,069	0	0	0	
60	8	284,644	0,575	0,26173114	0,00026173	4,36219E-06
900	30	284,909	0,840	0,38230264	0,0003823	4,24781E-07
1800	42	285,2	1,131	0,51470379	0,0005147	2,85947E-07
3600	60	285,46	1,391	0,63300035	0,000633	1,75833E-07
10920	104	286,079	2,010	0,91463717	0,00091464	8,3758E-08
12720	113	286,158	2,089	0,95058112	0,00095058	7,47312E-08
14520	120	286,167	2,098	0,954676	0,00095468	6,5749E-08
16320	128	286,257	2,188	0,99562481	0,00099562	6,10064E-08
86880	295	287,677	3,60825	1,64170604	0,00164171	1,88962E-08
174720	418	288,73	4,66125	2,12080711	0,00212081	1,21383E-08
347520	590	290,04	5,97125	2,71683979	0,00271684	7,81779E-09
434520	659	290,487	6,41825	2,92021888	0,00292022	6,72056E-09
514440	717	290,893	6,82425	3,10494351	0,00310494	6,03558E-09
PROMEDIO						4,29662E-07

Tabla 35 Permeabilidad 10% M10

10						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	309,104	0	0	0	
60	8	309,745	0,642	0,29946763	0,00029947	4,99113E-06
900	30	310,068	0,964	0,4502518	0,00045025	5,0028E-07
1800	42	310,304	1,200	0,56042227	0,00056042	3,11346E-07
3600	60	310,496	1,392	0,65005249	0,00065005	1,8057E-07
10920	104	311,04	1,937	0,90400477	0,000904	8,27843E-08
12720	113	311,102	1,998	0,93294786	0,00093295	7,3345E-08
14520	120	311,097	1,993	0,93061374	0,00093061	6,40919E-08

16320	128	311,14	2,036	0,95068718	0,00095069	5,82529E-08
86880	295	312,278	3,1745	1,48193294	0,00148193	1,70572E-08
174720	418	313,139	4,0355	1,88386845	0,00188387	1,07822E-08
347520	590	314,225	5,1215	2,39083937	0,00239084	6,87972E-09
434520	659	314,647	5,5435	2,58783912	0,00258784	5,95563E-09
514440	717	315,033	5,9295	2,7680332	0,00276803	5,38067E-09
PROMEDIO						4,85219E-07

Tabla 36 Permeabilidad 10% M11

11						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S ^{1/2}	g	g	mm	m	m/s
0	0	279,429	0	0	0	
60	8	280,126	0,697	0,32804048	0,00032804	5,46734E-06
900	30	280,4	0,971	0,45699757	0,000457	5,07775E-07
1800	42	280,647	1,218	0,57324721	0,00057325	3,18471E-07
3600	60	281	1,571	0,73938536	0,00073939	2,05385E-07
10920	104	281,662	2,233	1,05095322	0,00105095	9,62411E-08
12720	113	281,716	2,287	1,07636812	0,00107637	8,46201E-08
14520	120	281,775	2,346	1,10413625	0,00110414	7,60424E-08
16320	128	281,844	2,415	1,13661085	0,00113661	6,96453E-08
86880	295	283,277	3,848	1,81104701	0,00181105	2,08454E-08
174720	418	284,353	4,924	2,31746245	0,00231746	1,32639E-08
347520	590	285,686	6,257	2,94483398	0,00294483	8,47385E-09
434520	659	286,141	6,712	3,15897805	0,00315898	7,27004E-09
514440	717	286,467	7,038	3,31240875	0,00331241	6,43886E-09
PROMEDIO						5,2937E-07

Tabla 37 Permeabilidad 10% M12

12						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S ^{1/2}	g	g	mm	m	m/s
0	0	267,825	0	0	0	

60	8	268,421	0,596	0,27168546	0,00027169	4,52809E-06
900	30	268,622	0,797	0,36331092	0,00036331	4,03679E-07
1800	42	268,824	0,999	0,45539224	0,00045539	2,52996E-07
3600	60	269,028	1,203	0,54838525	0,00054839	1,52329E-07
10920	104	269,502	1,677	0,76445724	0,00076446	7,00052E-08
12720	113	269,56	1,735	0,79089643	0,0007909	6,21774E-08
14520	120	269,603	1,778	0,8104979	0,0008105	5,58194E-08
16320	128	269,623	1,798	0,81961486	0,00081961	5,02215E-08
86880	295	270,644	2,819	1,28503575	0,00128504	1,47909E-08
174720	418	271,493	3,668	1,67205078	0,00167205	9,56989E-09
347520	590	272,612	4,787	2,18214479	0,00218214	6,27919E-09
434520	659	273,144	5,319	2,42465597	0,00242466	5,58008E-09
514440	717	273,503	5,678	2,58830543	0,00258831	5,03131E-09
PROMEDIO						4,32044E-07

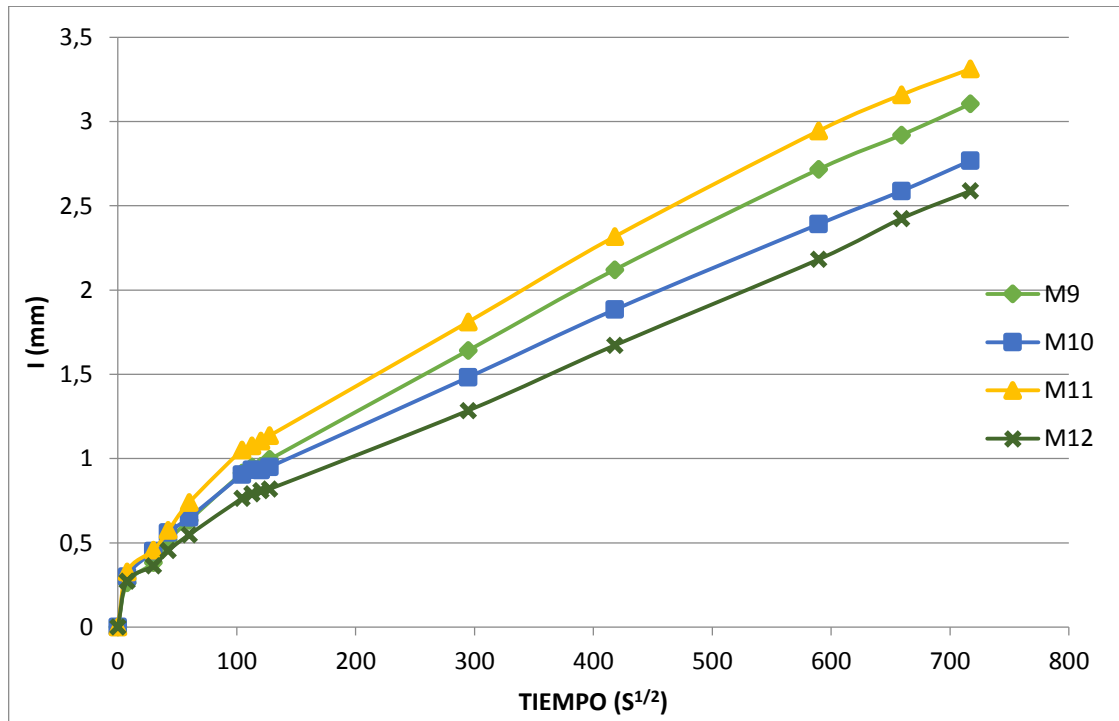


Figura 26 Permeabilidad 10%

4.17.4 MEZCLA CON 15% DE CENIZA

Tabla 38 Permeabilidad 15% M13

13						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	341,526	0	0	0	
60	8	341,964	0,438	0,19986996	0,00019987	3,33117E-06
900	30	342,2	0,674	0,30750101	0,0003075	3,41668E-07
1800	42	342,444	0,918	0,41878058	0,00041878	2,32656E-07
3600	60	342,69	1,164	0,53097227	0,00053097	1,47492E-07
10920	104	343,215	1,689	0,77040577	0,00077041	7,055E-08
12720	113	343,266	1,740	0,79366502	0,00079367	6,2395E-08
14520	120	343,307	1,781	0,81236364	0,00081236	5,59479E-08
16320	128	343,297	1,771	0,807803	0,0008078	4,94977E-08
86880	295	344,566	3,04025	1,38654795	0,00138655	1,59593E-08
174720	418	345,603	4,07725	1,85948611	0,00185949	1,06427E-08
347520	590	346,997	5,47125	2,49523904	0,00249524	7,18013E-09
434520	659	347,585	6,05925	2,76340455	0,0027634	6,35967E-09
514440	717	347,968	6,44225	2,93807698	0,00293808	5,71121E-09
PROMEDIO						3,33633E-07

Tabla 39 Permeabilidad 15% M14

14						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S1/2	g	g	mm	m	m/s
0	0	313,013	0	0	0	
60	8	313,553	0,540	0,24850343	0,0002485	4,14172E-06
900	30	313,807	0,794	0,36539208	0,00036539	4,05991E-07
1800	42	313,998	0,985	0,45328867	0,00045329	2,51827E-07
3600	60	314,251	1,238	0,56971713	0,00056972	1,58255E-07
10920	104	314,816	1,803	0,82972535	0,00082973	7,59822E-08
12720	113	314,863	1,850	0,85135435	0,00085135	6,69304E-08
14520	120	314,896	1,883	0,86654067	0,00086654	5,96791E-08

16320	128	314,978	1,965	0,90427638	0,00090428	5,54091E-08
86880	295	316,251	3,238	1,49010021	0,0014901	1,71512E-08
174720	418	317,328	4,315	1,98572649	0,00198573	1,13652E-08
347520	590	318,768	5,755	2,64840231	0,0026484	7,62086E-09
434520	659	319,34	6,327	2,91163187	0,00291163	6,7008E-09
514440	717	319,736	6,723	3,09386772	0,00309387	6,01405E-09
PROMEDIO						4,04973E-07

Tabla 40 Permeabilidad 15% M15

15						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S ^{1/2}	g	g	mm	m	m/s
0	0	332,144	0	0	0	
60	8	332,562	0,418	0,19144905	0,00019145	3,19082E-06
900	30	332,728	0,584	0,26747906	0,00026748	2,97199E-07
1800	42	332,914	0,770	0,35266931	0,00035267	1,95927E-07
3600	60	333,145	1,001	0,4584701	0,00045847	1,27353E-07
10920	104	333,644	1,500	0,68701813	0,00068702	6,29137E-08
12720	113	333,755	1,611	0,73785748	0,00073786	5,80077E-08
14520	120	333,71	1,566	0,71724693	0,00071725	4,93972E-08
16320	128	333,791	1,647	0,75434591	0,00075435	4,62222E-08
86880	295	334,931	2,787	1,27647969	0,00127648	1,46924E-08
174720	418	335,915	3,771	1,72716359	0,00172716	9,88532E-09
347520	590	337,137	4,993	2,28685436	0,00228685	6,5805E-09
434520	659	337,681	5,537	2,53601294	0,00253601	5,83635E-09
514440	717	338,022	5,878	2,69219506	0,0026922	5,23325E-09
PROMEDIO						3,13082E-07

Tabla 41 Permeabilidad 15% M16

16						
TIEMPO	√TIEMPO	PESO	Δ PESO	INFILTRACIÓN (l)	INFILTRACIÓN (l)	PERMEABILIDAD (K)
S	S ^{1/2}	g	g	mm	m	m/s
0	0	293,133	0	0	0	
60	8	293,536	0,403	0,18507815	0,00018508	3,08464E-06
900	30	293,759	0,626	0,2875547	0,00028755	3,19505E-07
1800	42	293,987	0,854	0,39232892	0,00039233	2,17961E-07
3600	60	294,267	1,134	0,52099902	0,000521	1,44722E-07
10920	104	294,847	1,714	0,78752995	0,00078753	7,21181E-08
12720	113	294,933	1,800	0,82705005	0,00082705	6,50197E-08
14520	120	294,951	1,818	0,8353217	0,00083532	5,7529E-08
16320	128	295,014	1,881	0,86427247	0,00086427	5,29579E-08
86880	295	296,465	3,33175	1,53105932	0,00153106	1,76227E-08
174720	418	297,59	4,45675	2,0480374	0,00204804	1,17218E-08
347520	590	299,077	5,94375	2,73136754	0,00273137	7,8596E-09
434520	659	299,562	6,42875	2,95424254	0,00295424	6,79886E-09
514440	717	300,015	6,88175	3,16241238	0,00316241	6,14729E-09
PROMEDIO						3,12661E-07

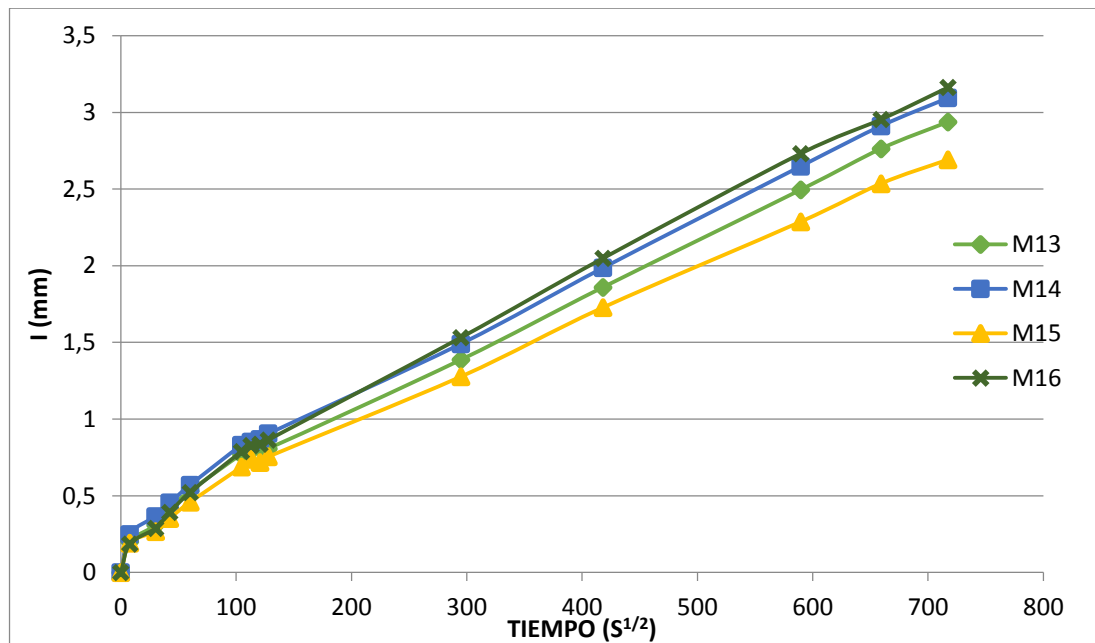


Figura 27 Permeabilidad 15%

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA Y FINAL

Teniendo en cuenta que el módulo de finura de la arena no cumplía los rangos contemplados en la norma del ICPC (2,4 – 3,0), se acordó trabajar con el criterio de diseño utilizando el menor porcentaje de vacíos lo cual fue aceptado por el ente cofinanciador de este estudio (Ecopetrol-ICP), ya que se espera la validación de este método para aplicaciones industriales.

Según el método del menor porcentaje de vacíos, inicialmente se determinó el valor de la Masa Unitaria de la mezcla de agregados que arrojaba el menor índice, encontrando que el porcentaje de 60% de triturado y 40% de arena cumplía este propósito. Las proyecciones de la resistencia del concreto a los 28 días partiendo de la resistencia a los 7 días permitieron la toma de decisiones respecto a la dosificación final.

5.2 AGREGADOS

Se cuenta con un agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 1” con unas excelentes propiedades, pues contaba con un mínimo porcentaje de absorción, humedad y una excelente resistencia al desgaste por abrasión.

Por otra parte la arena poseía un módulo de finura de 3,42 refiriéndose al excesivo grosor de la arena con la cual contamos para el estudio que se llevó a cabo; la arena al igual que el agregado grueso presentaba una humedad relativamente baja y además su contenido de materia orgánica era mínimo.

El módulo de finura de la arena (3,42) estaba contemplado dentro del rango establecido en la norma ASTM C.33, sin embargo no permitía trabajar con la metodología de diseño de mezclas de Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) por consiguiente se optó por desarrollar el diseño de la mezcla basados en el menor porcentaje de vacíos.

5.3 CEMENTO

El cemento poseía una densidad de $2,94 \text{ gr/cm}^3$ la cual a medida que se le fue añadiendo ceniza como porcentaje de cemento fue variando de manera inversa, es decir que a medida que se fue aumentando el porcentaje de ceniza fue disminuyendo la densidad del cemento hasta alcanzar la densidad mínima de $2,78 \text{ gr/cm}^3$ cuyo porcentaje de ceniza añadido fue del 15%.

El cemento además mostró buenos resultados ante la prueba de tiempo de fraguado y consistencia.

5.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Inicialmente la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos era baja, por tal motivo se realizaron los respectivos ajustes para lograr la resistencia de diseño (4000 Psi). Según los antecedentes de concretos modificados con ceniza volante se sabe que esta disminuye la resistencia a edades tempranas, pero que al cabo de finalizar la última edad de curado (28 días) la mezcla alcanza la resistencia de diseño.

Finalmente debido a que el uso de la ceniza incidiera fuertemente en la resistencia de cada una de las mezclas modificadas fue necesario aumentar la cantidad de cemento en un 30% para poder lograr la resistencia de diseño, lo que ocasionó aumentos en los costos de ejecución, por tal razón en relación beneficio costo no es favorable el uso de la ceniza.

5.5 PERMEABILIDAD

Siendo la permeabilidad la razón de la investigación se observa que la adición de ceniza no favorece la impermeabilidad del concreto por cuanto el mejor resultado se obtuvo en concretos sin adición de ceniza en donde se evidenció la menor velocidad infiltración, es decir que evitaba o no permitía que el agua penetrara con tanta facilidad.

A continuación se representa gráficamente como varía la permeabilidad en cada una de las mezclas (ver Figura 28).

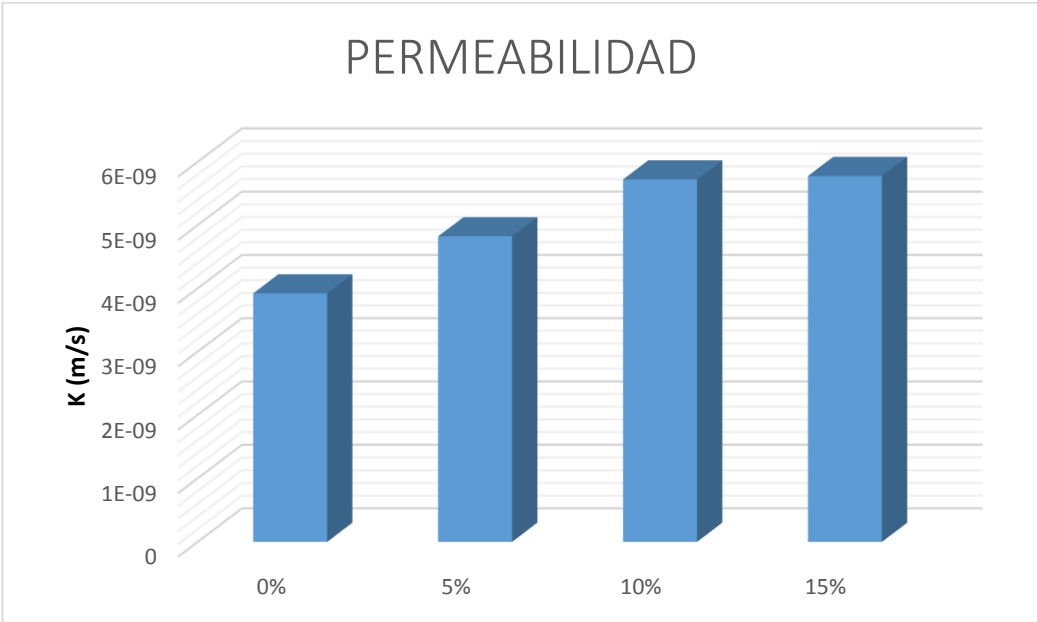


Figura 28 Variación de la permeabilidad

6 CONCLUSIONES

- El uso de ceniza volante como porcentaje de cemento con el fin de disminuir la permeabilidad del concreto de 4000 Psi no arrojó los resultados esperados, la modificación no resultó útil, por tanto no es apropiado el uso de la ceniza para modificar concretos cuyo uso sea en estructuras que estén en contacto con fluidos. Adicionalmente, fue necesario el aumento de un 30% en el porcentaje del cemento para lograr la resistencia de 4000 Psi, lo cual aumenta costos haciendo aún menos viable el uso de este tipo de ceniza para concretos de alta resistencia. El aumento del 30% de la cantidad de cemento fue necesaria porque aportó a la mezcla la pasta requerida que generó la adherencia entre los áridos, formando así un conglomerado óptimo para su manipulación, situación que se presentaba debido a que las partículas de agregado fino eran demasiado gruesas lo que evitaba que se unieran con facilidad.
- Tanto la ceniza como la particularidad que presentaba el agregado fino ocasionaban aislamiento entre los materiales, es por ello que en ocasiones se presentaba aumento de hasta un 23% de la cantidad de agua para obtener la fluidez y el asentamiento de diseño.
- A partir de la infiltración de cada una de las muestras ensayadas fue posible determinar la permeabilidad y el comportamiento que presentaba cada una de las mezclas modificadas al igual que la mezcla testigo, expresando que a medida que aumentaba la cantidad de ceniza añadida a la mezcla, mayor era la velocidad con la que penetraba el agua.

7 RECOMENDACIONES

Aunque el resultado obtenido en esta investigación indica la no viabilidad del uso de este tipo de ceniza añadida como porcentaje del cemento en preparación de concreto de alta resistencia se recomienda continuar el estudio, controlando variables como el módulo de finura buscando que sea menor a 3.42 para que así todos los materiales que hacen parte de la mezcla puedan aglomerarse bien. Adicionalmente, sería conveniente replicar la investigación haciendo uso del permeámetro para concretos que adquirió la universidad, herramienta que ayudará a precisar los resultados de la investigación.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). STANDARS TEST METHOD FOR MEASUREMENT OF RATE OF ABSORTION OF WATER HYDRAULIC CEMENT CONCRETES.

American Society for Testing Materials (ASTM). (1999). STANDARD SPECIFICATION FOR CONCRETE AGGREGATES.

Aurelio, R. (2010). LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE. MADRID, ESPAÑA.

Cifuentes Alvaro, F. C. (2006). ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A EDADES TARDÍAS DEL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA. BUCARAMANGA.

CONSEJO DE LA CONSTRUCCIÓN VERDE. (2010). LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE. MADRID.

David, R. M. (2012). EFECTO DE LA INCORPORACION DE MATERIALES BASADOS EN SILICE SOBRE LAS PROPIEDADES DE MATRICES DE CEMENTO PORTLAND Y ACTIVADAS ALCALINAMENTE. VALENCIA.

Diego, S. d. (1997). TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES. En S. d. Diego. BOGOTÁ.

Gómez Cano, J. C. (2008). IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE ALGUNOS FACTORES EN LA PERMEABILIDAD DE CONCRETOS Y MORTEROS. BOGOTA: TRABAJO DE GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA DE MATERIALES Y PROCESOS.

Gomez Galvis Fedy A, M. T. (2013). EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETO PREPARADO CON ALTOS VOLUMENES DE CENIZA PROVENIENTE DE LOCACIONES PETROLERAS. B: BUCARAMANGA.

Guerrero Vargas Diego A, C. G. (2013). EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETO SIMPLE (3000 Psi) UTILIZANDO CENNIZA COMO PORCENTAJE DE CEMENTO. BUCARAMANGA.

HEADWATERS RESOURCES. (2013). HEADWATERS RESOURCES. Recuperado el 12 de OCTUBRE de 2014, de <http://flyash.com/>

Hermida, G. (2013). CONCRETO DE BAJA PERMABILIDAD, ALGO MAS QUE DISMINUIR A/C. SIKA.

ICPC. (1982). MÉTODO PRÁCTICO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO. MEDELLÍN.

INVIAS. (2007). NORMAS INVIAS.

Luis, C. S. (1988). *CONTRIBUCIÓN AL MODELADO DE LA GENESIS DE LA CENIZA VOLANTE EN LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO, APLICACIÓN PARA CENTRALES TERMICAS DE GRAN POTENCIA. SEVILLA.*

Mauricio Ossa M, H. J. (1984). *CEMENTOS CON CENIZAS VOLANTES. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.*

O. I. Molina Bas, A. M. (2008). *LA INFLUENCIA DE LAS CENIZAS VOLANTES COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND EN LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN. Anales de Mecánica de la Fractura, Vol 2 575-580.*

PACHON, A. C., & JARAMILLO, C. I. (2006). *ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A EDADES TARDÍAS DEL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIONES DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA. BUCARAMANGA.*

REVISTA SEMANA. (2012). *El Mundo Respira CO2. REVISTA SEMANA.*

Sánchez de Rojas M Isabel, F. M. (2012). *COMPORTAMIENTO TERMICO DE LOS MATERIALES PUZOLANICOS EN LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. MADRID, MADRID, ESPAÑA.*

Sarmiento Garcés Carlos O, A. D. (2012). *EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS MODIFICADOS CON CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS. BUCARAMANGA.*

SIKA COLOMBIA. (2012). *CURADO DEL CONCRETO.*

Sofía, S. S. (2010). *MEZCLAS BINARIAS Y TERNARIAS BASADAS EN CENIZA VOLANTE, INFLUENCIA DEL ACTIVADOR SOBRE LA FORMACIÓN DE FASES Y RESISTENCIAS MECÁNICAS. BARCELONA.*

Sofía, S. S. (2010). *MEZCLAS BINARIAS Y TERNARIAS BASADAS EN CENIZA VOLANTE. INFLUENCIA DEL ACTIVADOR SOBRE LA FORMACIÓN DE FASES Y RESISTENCIAS MECÁNICAS. BARCELONA.*

Trochez Jenny J, G. R. (2010). *ESTUDIO DE LA HIDRATACION DE PASTAS DE CEMENTO ADICIONADAS CON CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALITICO USADO DE UNA REFINERIA COLOMBIANA. FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE ANTIOQUIA.*

UNIVERSIDAD DE SONORA. (2010). *CONCRETO ELABORADO CON CENIZA VOLANTE. MEXICO.*

Valdez Pedro L, D. A. (2007). *CONCRETOS FLUIDOS CON ALTOS VOLUMENES DE CENIZA VOLANTE. MONTERREY.*

VÉLEZ, L. M. (2010). PERMEABILIDAD Y POROSIDAD EN CONCRETO. TECNO LÓGICAS, 169-187.