

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO  
MODIFICADO CON RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.**



**DANIEL EDUARDO RAMÍREZ BREWER  
MARÍA FERNANDA VERGARA ÁLVIZ**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2013**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO  
MODIFICADO CON RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.**

**Grupo de Investigación: Modelación de Partículas y Procesos.**

**DANIEL EDUARDO RAMÍREZ BREWER**

**MARÍA FERNANDA VERGARA ÀLVIZ**

**Proyecto de Grado Como Requisito para Optar al Título de Ingeniero Químico**

**Director**

**María Teresa Acevedo Morantes, M.Sc**

**Asesor**

**Luis Eduardo Pérez Martelo, Ingeniero Químico y Civil.**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2013**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Cartagena de Indias, 23 de julio del 2013.

*A Dios por toda su infinita gloria, por darme la oportunidad de vivir y estudiar mi profesión, por estar cada paso que doy, por permitirme cumplir mis metas y por todas las cosas buenas puestas en mi camino.*

*A mi madre Carlota Brewer por todo su sacrificio y valor, por sacarme adelante, por su sabiduría y consejos, por demostrarme fortaleza en los momentos de dificultad pero más que nada por todo su amor.*

*A mi abuela Carlota Quintana por todas sus enseñanzas, por compartir toda mi vida con ella y por todo el valor mostrado para salir adelante, por su amor y cariño.*

*A mi hermano David Ramírez Brewer por ser el pilar de mi profesión, por toda su ayuda y por todo su apoyo.*

*A la mujer de mi vida, mi novia y compañera de tesis María Fernanda Vergara Alviz por todo su amor, cariño y por toda su paciencia, por nuestra relación, por todo su apoyo brindado en los momentos más difíciles de mi vida por ser mi motivación, mi amor y mi futuro, TE AMO.*

*Al Sr. Jacinto Vergara y la Sra. María Alviz por toda su ayuda, por la confianza puesta en mí y por todo su cariño brindado.*

*A mi padre Abercio Ramírez por toda la ayuda prestada en mi formación profesional.*

*A la ingeniera María Teresa Acevedo que además de ser nuestra tutora fue nuestra guía y nuestro apoyo fundamental en este trabajo.*

*A mis profesores por todos los conocimientos dados en mi proceso de formación académica.*

*Finalmente a mis compañeros y amigos que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación y que hasta ahora seguimos siendo amigos.*

*Daniel Eduardo Ramírez Brewer*

*A Dios, por regalarme la oportunidad de vivir cada día, por llenarme de sabiduría y fortalecerme en los momentos difíciles, todo te lo debo a ti mi señor, porque de tu mano me sostuve para que lo imposible se hiciera posible con tu amor y tu bondad, Bendito eres Señor.*

*Con mucho amor y cariño a mis padres María Alviz y Jacinto Vergara, por su amor, sus consejos, por todos los valores que me enseñaron, porque son mi motivación para seguir luchando y darles lo mejor del mundo, se lo merecen; gracias a ustedes por que pude cumplir un objetivo en mi vida, porque simplemente los amo, porque no hay nada como el beso de una madre, el abrazo de un buen padre y el cariño del hogar tan bello.*

*A mis hermanos Jadier y Yuliena por su apoyo incondicional y su amor, a mi sobrinitos Juan Diego y Jesús David que son lo más hermoso de mi familia.*

*A mi novio, mejor amigo y compañero de tesis, Daniel Ramírez Brewer, por su amor, por su apoyo incondicional, por estar conmigo cuando más lo necesito, por su paciencia, que Dios bendiga esta relación, Te amo.*

*A la profesora María Teresa Acevedo por su apoyo incondicional, porque aparte de ser nuestra directora fue como una madre para nosotros.*

*A mis familiares y amigos que me acompañaron a lo largo de mi carrera y por cada momento vivido en nuestro camino universitario.*

*María Fernanda Vergara Alviz*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar a Dios por permitirnos culminar este proyecto y carrera, queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestra directora del proyecto la ingeniera María Teresa Acevedo Morantes por su apoyo incondicional, a nuestro asesor el ingeniero Luis Eduardo Pérez Martelo, por su ayuda y conocimientos brindados.

Queremos agradecer al Ingeniero Modesto Barrios Fontalvo y su hijo Modesto Junior, por habernos ayudado incansablemente en la realización de las pruebas mecánicas.

También expresamos nuestros agradecimientos a los profesores William Villa y Juan Montenegro por su ayuda brindada en los laboratorios de civil.

A Mabelita y Angie González por toda su ayuda y colaboración en el programa de Ingeniería Química.

A los Ingenieros Adalberto Matute Thowinson y Rodrigo Ricardo Paredes por ser nuestros evaluadores y por sus valiosas recomendaciones.

A la Universidad de Cartagena, por nuestro proceso de formación profesional y humano.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
1.OBJETIVOS .....	5
1.1.OBJETIVO GENERAL .....	5
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
2.ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
3.HIPÓTESIS .....	7
3.1.HIPOTESIS DE TRABAJO .....	7
3.2.HIPOTESIS NULA.....	7
4.MARCO REFERENCIAL.....	8
4.1.MARCO TEÓRICO.....	8
4.1.1.Granalla de silicato de aluminio.....	8
4.1.1.1.Definición.....	8
4.1.1.2.Características .....	8
4.1.1.3.Composición química.....	9
4.1.2.Cemento Portland.....	9
4.1.2.1.Definición.....	9
4.1.2.2.Clasificación.....	9
4.1.2.3.Obtención .....	10
4.1.2.4.Composición química del cemento portland.....	11
4.1.2.5.Finura .....	11
4.1.2.6.Peso específico .....	12
4.1.3.Agua .....	13
4.1.3.1.Definición.....	13
4.1.3.2. Clasificación.....	13
4.1.4.Agregados .....	13
4.1.4.1.Definición.....	13

4.1.4.2. Tipos de agregados.....	13
4.1.4.3. Propiedades de los agregados.....	14
4.1.5. Concreto fresco y endurecido.....	16
4.1.5.1. Concreto fresco .....	16
4.1.5.2. Concreto endurecido .....	17
4.2. ANTECEDENTES.....	20
4.3. ESTADO DEL ARTE.....	22
5. METODOLOGÍA .....	26
5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	26
5.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	26
5.2.1. Fuentes de recolección primaria.....	26
5.2.2. Fuentes de recolección secundaria .....	26
5.3. VARIABLES .....	27
5.3.1. Variables independientes .....	27
5.3.2. Variables dependientes.....	27
5.3.3. Variables Intervinientes .....	28
5.4. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
5.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA MATERIA PRIMA DEL CONCRETO .....	31
5.5.1. Ensayos de laboratorio sobre el Cemento Portland tipo I marca Argos .....	31
5.5.1.1. Ensayo para la determinación de la finura del cemento.....	31
5.5.1.2. Ensayo de peso específico del cemento .....	32
5.5.2. Ensayos de laboratorio sobre el agregado grueso (grava triturada) .....	32
5.5.2.1. Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso .....	32
5.5.2.2. Ensayo de granulometría para los agregados gruesos.....	33
5.5.3. Ensayo de laboratorio sobre el agregados fino (arena) .....	33
5.5.3.1. Ensayo de densidad y absorción de agua del agregado fino .....	33
5.5.3.2. Ensayo de granulometría del agregado fino.....	34
5.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO. ....	34



5.7.DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO .....	34
5.8.ELABORACIÓN Y CURADO DE LAS MUESTRAS (PROBETAS Y VIGUETAS) ...	35
5.9.ENSAYOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS:.....	36
5.9.1.Ensayo de resistencia a la compresión:.....	36
5.9.2.Ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	36
5.9.3.Ensayo de resistencia a la flexión. ....	36
6.RESULTADOS Y ANALISIS.....	37
6.1.ENSAYOS SOBRE EL CEMENTO MARCA ARGOS, TIPO I.....	37
6.1.1.Ensayo de finura del cemento .....	37
6.1.2.Ensayo de peso específico del cemento .....	37
6.2.ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE EL AGREGADO GRUESO (GRAVA TRITURADA) .....	38
6.2.1.Ensayo de gravedad específica y absorción de agua.....	38
6.2.2.Ensayo de granulometría del agregado grueso.....	39
6.3.ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE EL AGREGADO FINO Y RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.....	41
6.3.1.Ensayo de densidad y absorción de agua .....	41
6.3.2.Ensayo de granulometría de agregado fino y residuo .....	42
6.4.DISEÑO DE MEZCLA .....	44
6.5.ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	44
6.6.ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA .....	50
6.7.ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN. ....	54
6.8.ANALISIS DE BENEFICIO ECONÓMICO DEL USO DE RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.....	56
CONCLUSIONES .....	60
RECOMENDACIONES .....	62
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS .....	68

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Características fisicoquímicas de la granalla de silicato de aluminio.....	8
<b>Tabla 2.</b> Composición química de la granalla de silicato de aluminio.....	9
<b>Tabla 3.</b> Composición química del cemento portland.....	11
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje que pasa de agregado fino según la norma ASTM C33.....	14
<b>Tabla 5.</b> Aumento promedio de la resistencia a la compresión del concreto, con el tiempo, para varios cementos Tipo I colombianos.....	18
<b>Tabla 6.</b> Variables independientes. ....	27
<b>Tabla 7.</b> Variables dependientes.....	28
<b>Tabla 8.</b> Variables Intervinientes. ....	29
<b>Tabla 9.</b> Resumen detallado de las muestras para ensayo a la compresión. ....	30
<b>Tabla 10.</b> Resumen detallado de las muestras para ensayo a la tracción. ....	30
<b>Tabla 11.</b> Resumen detallado de las muestras para ensayo a la flexión.....	31
<b>Tabla 12.</b> Valores obtenidos de la finura de cemento .....	37
<b>Tabla 13.</b> Valores obtenidos del ensayo de peso específico del cemento.....	38
<b>Tabla 14.</b> Valores obtenidos del ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso. ....	39
<b>Tabla 15.</b> Valores obtenidos del ensayo de granulometría del agregado grueso. ....	39
<b>Tabla 16.</b> Valores obtenidos del ensayo de densidad y absorción de agua del agregado fino y del residuo de granalla de silicato de aluminio. ....	41
<b>Tabla 17.</b> Valores obtenidos del ensayo de granulometría del agregado fino y del residuo...	42
<b>Tabla 18.</b> Valores obtenidos del diseño experimental.....	44
<b>Tabla 19.</b> Valores promedios obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 7, 14 y 28 días. ....	45
<b>Tabla 22.</b> ANOVA para la resistencia a la compresión de 7, 14 y 28 días. ....	46
<b>Tabla 23.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 7, 14 y 28 días. ....	50
<b>Tabla 24.</b> ANOVA para la resistencia a la Tracción Indirecta de 7, 14 y 28 días. ....	51

<b>Tabla 26.</b> Valores promedios obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión para 28 días. .	54
<b>Tabla 27.</b> ANOVA para la resistencia a la flexión de 28 días. ....	54
<b>Tabla 28.</b> Costos de mezcla general de 1m <sup>3</sup> de concreto para una resistencia de 3000 PSI. .	56
<b>Tabla 29.</b> Costos del diseño de mezcla de 1m <sup>3</sup> de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 0% de sustitución de residuo. ....	57
<b>Tabla 30.</b> Costos del diseño de mezcla de 1m <sup>3</sup> de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 10% de sustitución de residuo. ....	57
<b>Tabla 31.</b> Costos del diseño de mezcla de 1m <sup>3</sup> de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 30% de sustitución de residuo. ....	58
<b>Tabla 32.</b> Costos del diseño de mezcla de 1m <sup>3</sup> de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 50% de sustitución de residuo. ....	58
<b>Tabla A 1.</b> Diseño Multi-factor categórico para la resistencia a la compresión. ....	69
<b>Tabla A 2.</b> Diseño Multi-factor categorico para la resistencia a la tracción. ....	69
<b>Tabla A 3.</b> Diseño Multi- factor categórico para la resistencia a la flexión. ....	70
<b>Tabla A 4.</b> Abundancia Relativa de elementos en el residuo de Granalla de silicato de aluminio. ....	80
<b>Tabla A 5.</b> Fases cristalinas del Residuo de granalla de silicato de aluminio. ....	82
<b>Tabla A 6.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 28 días. ....	95
<b>Tabla A 7.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 7 días. ....	95
<b>Tabla A 8.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 14 días. ....	96
<b>Tabla A 9.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 14 días. ....	96
<b>Tabla A 10.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 28 días. ....	97
<b>Tabla A 11.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 28 días. ....	97
<b>Tabla A 12.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 7 días. ....	98
<b>Tabla A 13.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 7 días. ....	98

<b>Tabla A 14.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 14 días. ....	99
<b>Tabla A 15.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 14 días. ....	99
<b>Tabla A 16.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 28 días. ....	100
<b>Tabla A 17.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 28 días .....	100
<b>Tabla A 18.</b> Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión para 28 días. ....	101
<b>Tabla A 19.</b> Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la flexión de 28 días. ....	101

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Proceso de obtención del cemento portland .....	10
<b>Figura 2.</b> Grafica de la curva granulométrica del agregado grueso. ....	40
<b>Figura 3.</b> Grafica de las dos curvas granulométricas del agregado fino y del residuo.....	42
<b>Figura 4.</b> Valores de la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días.....	47
<b>Figura 5.</b> Grafica de los valores de la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días y el comportamiento ideal del cemento Argos tipo I. ....	49
<b>Figura 6.</b> Grafica de los valores de la resistencia a la tracción a 7, 14 y 28 días. ....	52
<b>Figura 7.</b> Grafica de los valores de la resistencia a la flexión a 28 días. ....	55
<b>Figura A 1.</b> Finura del cemento (Proceso de tamizado del cemento.....	71
<b>Figura A 2.</b> a. Frasco de Le Chatelier; b. Frasco con la solución de kerosene más 64g de cemento .....	71
<b>Figura A 3.</b> Peso del agregado grueso saturado sumergido en agua; b. Peso del agregado grueso saturado superficialmente seco; c. Peso del agregado grueso seco en el aire. ....	72
<b>Figura A 4.</b> Arena saturada superficialmente seca, para ensayo con el cono .....	72
<b>Figura A 5.</b> a. Peso de la muestra saturada superficialmente seca; b. Peso del Picnómetro más el agua adicionada y la muestra saturada superficialmente seca; c. Peso de la muestra seca. ....	73
<b>Figura A 6.</b> a. Peso de la muestra de residuo saturada superficialmente seca; b. Peso del Picnómetro más el agua adicionada y la muestra saturada superficialmente seca; c. Peso de la muestra seca. ....	73
<b>Figura A 7.</b> Distribución y compactación de las capas de concreto. ....	74
<b>Figura A 8.</b> Moldes para cilindros y viguetas. ....	74
<b>Figura A 9.</b> Piscina de curado de cilindros y viguetas. ....	74
<b>Figura A 10.</b> Maquina universal. ....	75
<b>Figura A 11.</b> Muestras cilíndricas de la piscina y secadas superficialmente. ....	75
<b>Figura A 12.</b> Bandas de neopreno y haz de luz entre la máquina y las bandas con la muestra. ....	75
<b>Figura A 13.</b> Ruptura del cilindro. ....	76

<b>Figura A 14.a.</b> Ruptura del cilindro; b. platinas de hierro. ....	76
<b>Figura A 15.</b> Máquina para ensayo de flexión. ....	77
<b>Figura A 16.a.</b> Toma de muestra de ensayo de Flexión; b. Ruptura de la vigueta. ....	77
<b>Figura A 17.</b> Muestras probadas de compresión y flexión. ....	78
<b>Figura A 18.</b> Aspecto general del Residuo de Granalla de silicato de aluminio.....	80
<b>Figura A 19.</b> Composición General del residuo de granalla de silicato de aluminio.....	81
<b>Figura A 20.</b> a. Fases cristalinas; b. Difractograma .....	82
<b>Figura A 21.</b> Ensayo de impurezas orgánicas de las muestras. De derecha a izquierda: arena pura, muestra al 10% de sustitución de residuo, muestra al 30% de sustitución de residuo, muestra al 50% de sustitución de residuo, residuo de granalla de silicato de aluminio. ....	102

## ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> .....	<b>69</b>
<b>ANEXO B.</b> .....	<b>69</b>
<b>ANEXO C</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXO D</b> .....	<b>83</b>
<b>ANEXO E</b> .....	<b>85</b>
<b>ANEXO F</b> .....	<b>86</b>
<b>ANEXO G</b> .....	<b>90</b>
<b>ANEXO H</b> .....	<b>95</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>102</b>

## RESUMEN

En la presente investigación se realizó una evaluación mecánica del residuo de granalla de silicato de aluminio mediante ensayos normalizados con el fin de obtener un concreto de alto rendimiento y generar una alternativa de disposición final del residuo; en primer lugar se hizo la caracterización fisicoquímica del residuo y materia prima del concreto tales como cemento tipo I marca argos, arena y grava triturada, se llevaron a cabo ensayos de granulometría, peso específico y absorción de agua que fueron determinantes a la hora de realizar el diseño de mezcla de concreto para los porcentajes de 0%, 10%, 30% y 50% de sustitución de residuo con respecto al peso de la arena, para luego elaborar las probetas y viguetas de acuerdo a la norma ASTM C31; se realizaron un total de 56 muestras incluyendo la réplica a las cuales se le efectuaron ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión de acuerdo a las normas ASTM C39, INV. E-411-07, INV. E-415-07 respectivamente. Los resultados indican que la muestra patrón presentó mayor resistencia a la compresión, en comparación a las otras muestras, sin embargo la muestra al 30% de sustitución presentó mayor resistencia a la tracción indirecta y a la flexión, mientras que la muestra al 50% de sustitución exhibió muy baja resistencia en todas las pruebas, este comportamiento se debe a que el residuo tiene un mayor módulo de finura que la arena por lo cual confiere una mejor resistencia mecánica pero al 50% la baja resistencia se debe al exceso de materia orgánica que contiene el residuo que afecta directamente la durabilidad y la resistencia mecánica, por lo anterior se concluye que el residuo se puede utilizar en aplicaciones de construcción como lo son pisos, andenes, losas y placas de contrapiso.



## ABSTRACT

In the present investigation was conducted evaluation of residual mechanical grit aluminum silicate by standard tests in order to obtain a high performance concrete and generating an alternative residue disposal, firstly became the physicochemical characterization of residue concrete and raw materials such as cement type I mark argos, sand and crushed gravel, trials were conducted grain size, specific gravity and water absorption were decisive when making the concrete mix design for the percentages of 0%, 10%, 30% and 50% substitution of residue on the weight of the sand, and then formulate and joists specimens according to ASTM C31, there were a total of 56 samples including the replica to which was conducted compression tests, splitting tensile and bending according to ASTM C39, INV. E-411-07, INV. E-415-07 respectively. The results indicate that the reference sample had a higher compression strength as compared to the other samples, however the sample at 30% substitution showed higher tensile and flexural indirectly, whereas the sample to 50% substitution exhibited very low resistance in all tests, this behavior is that the residue has a fineness modulus greater than the sand which gives improved mechanical strength to 50% but low resistance due to the excess organic matter containing the residue which directly affects the durability and mechanical strength, so one can conclude that the residue can be used in building applications such as floors, platforms, slabs and plates subfloor.

## INTRODUCCIÓN

La investigación de nuevos métodos para la obtención de un concreto con mejor resistencia mecánica y durabilidad, han sido el objetivo principal de investigadores en la industria de la construcción, por ello cada día se encuentran nuevos materiales que aumentan su durabilidad, resistencia e impermeabilidad, tal es el caso de microsílíce, cenizas al volante, resinas epóxicas, minerales silíceos, fibras reforzadas de polímeros, entre otros. Estudios preliminares han utilizado como aditivo en el concreto, el mineral aluminosilicato, este contiene en mayor proporción óxido de aluminio y sílice; con el fin de reducir la permeabilidad y por lo tanto aumentar la durabilidad del hormigón, evaluando las propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, tracción y la resistencia a la penetración de iones cloruro para medir la velocidad de corrosión, los resultados de esta investigación indicaron que dicho mineral es un material altamente puzolánico y puede ser empleado para obtener un concreto de alto rendimiento [1].

Además de los materiales mencionados anteriormente, actualmente se emplean residuos sólidos industriales como aditivos en el concreto, por ejemplo, las escorias de alto horno y horno eléctrico, son residuos provenientes de la fundición de hierro y acero; las cuales se emplean como materiales agregados en el concreto, confiriéndole a este un mejor comportamiento mecánico en comparación a un hormigón sin este tipo de aditivo [2]. La generación de residuos sólidos industriales es un problema que afecta al medio ambiente y a la salud humana, un ejemplo de esto son los residuos de granalla de silicato de aluminio.

La granalla de silicato de aluminio es un abrasivo usado para la limpieza a chorro de tanques de almacenamiento de crudo. Esta constituido principalmente por dióxido de silicio y trióxido de aluminio [3]. El principal uso de la granalla de silicato de aluminio es limpiar la superficie metálica la que posteriormente es tratada para contrarrestar los efectos de la corrosión por el cual las naciones cada año gastan en promedio 3% del PBI (Producto Interno Bruto) [4]. Estos abrasivos son muy eficientes a la hora de combatir la corrosión por su fácil uso y su economía, son reusados hasta cierto límite, lo que origina fraccionamiento del material o reducción del tamaño de partícula, ocasionando un residuo perjudicial por el tamaño fino del

material que permite su suspensión en el aire lo que facilita la inhalación y alojamiento del residuo en los pulmones de potenciales víctimas. Estos residuos son considerados como peligrosos debido a que pueden contener trazas de metales pesados e hidrocarburos, los cuales son compuestos tóxicos, contaminantes y volátiles que tienen efectos variados en los seres vivos, desde la irritación o alergias en el organismo e incluso hasta la muerte del ser humano [5,6].

Se presentan dos razones por las cuales se contempla el uso del residuo en el concreto, la primera es que el residuo de granalla de silicato de aluminio contiene trazas de metales pesados que deben ser aislados y aglomerados por un material aglomerante, como el cemento aplicando el proceso de cementación, el cual comprende el método de solidificación y estabilización de las trazas de metales [7] ; la segunda razón es que este residuo presenta una granulometría muy similar comparada con la de la arena, por lo cual se ha planteado como alternativa para reutilizarlo como mejora en las propiedades mecánicas del concreto, analizando la influencia de las cantidades del residuo de granalla de silicato de aluminio en las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, tracción y flexión.

Para llevar a cabo esta investigación se usaron los laboratorios de ingeniería química, ingeniería civil de la universidad de Cartagena y el laboratorio de la empresa BARRIOS PADILLA INGENIEROS S.A.S, donde se realizaron las pruebas fisicoquímicas y mecánicas; este proyecto está soportado por el grupo de investigación de Modelación de Partículas y Procesos del Programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena. A la vez, este proyecto de investigación tiene como propósito principal aprovechar los residuos de granalla de silicato de aluminio para fabricar concreto; el residuo y los demás componentes del concreto se caracterizaron mediante pruebas fisicoquímicas, posteriormente se elaboraron las muestras cilíndricas y viguetas para los ensayos de resistencia a la compresión, flexión y tracción para la evaluación de las propiedades mecánicas en la aplicación de este residuo como una alternativa en la solución a los problemas ambientales generados.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de silicato de aluminio mediante ensayos normalizados con el fin de obtener un concreto de alto.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las propiedades del residuo de granalla de silicato de aluminio y las materias primas adicionadas al concreto mediante pruebas fisicoquímicas.
- Determinar la resistencia a la compresión, tracción y flexión de la mezcla concreto-residuo de granalla de silicato de aluminio a diferentes dosificaciones para la selección de las composiciones adecuadas en la construcción.
- Analizar los beneficios económicos del uso de residuo de granalla de silicato de aluminio considerando los costos de operación para su aprovechamiento en la fabricación de concreto.

## 2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El aprovechamiento de residuos sólidos peligrosos generados en las industrias juega un papel muy importante ya que cuando se procede a utilizarlos se contrarresta la contaminación del medio ambiente que este genera y los posibles perjuicios que ocasionan al ser humano. El residuo de granalla de silicato de aluminio proveniente de las actividades de limpieza de las superficies corroídas de los tanques de almacenamiento de crudo, puede ser peligroso debido a que contiene trazas de hidrocarburos y metales; además por su granulometría (partículas PM10) es fácilmente suspendido en el aire e inhalado por los seres vivos.

La formulación de un nuevo concreto a partir del residuo de granalla de silicato de aluminio podría bajar los costos del uso del concreto a nivel de cliente de estrato bajo o alto, lo que originaría un aumento del uso de concretos para estos niveles. Sin embargo, el silicato de aluminio podría mejorar las propiedades mecánicas debido a que este proviene de un material puzolanico es decir que tiene propiedades cementantes y estas condiciones serían muy atractivas para cualquier cliente que desee un concreto de alto desempeño.

Este proyecto arrojó resultados que pueden beneficiar a la comunidad científica y local. Como se propone utilizar un material económico para la conformación de concreto y al mismo tiempo aminorar la acumulación de residuos de granalla de silicato de aluminio, es un proyecto que afecta positivamente a una amplia población y aporta información a futuras investigaciones acerca de la utilización de materiales sustituyentes en la mezcla de concreto.

### **3. HIPÓTESIS**

#### **3.1. HIPOTESIS DE TRABAJO**

Los residuos de granalla de silicato de aluminio son una alternativa como material puzolanico para producir un concreto de alto rendimiento y mejorar sus propiedades mecánicas.

#### **3.2. HIPOTESIS NULA**

El concreto modificado con el residuo de granalla de silicato de aluminio no presenta propiedades mecánicas apropiadas para su aplicación en la construcción.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. MARCO TEÓRICO:

En la búsqueda de concretos de alto rendimiento se han empleados distintos materiales que le proporcionan a este una alta durabilidad y el mejoramiento de las propiedades mecánicas, uno de los materiales a implementar son los residuos de granalla de silicato de aluminio debido a que provienen de un material puzolanico es decir alto contenido de silicio, compuesto que lo hace muy semejante a la arena utilizada en la mezcla de concreto.

#### 4.1.1. Granalla de silicato de aluminio

##### 4.1.1.1. Definición

Es un abrasivo obtenido de la escoria de carbón que se utiliza para la limpieza a chorro de superficies de aceros y hormigón, eliminando así las escamas metálicas, óxidos, pinturas viejas y suciedad [3].

##### 4.1.1.2. Características

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas de la granalla de silicato de aluminio.

Características	Valores
Tamaño del grano	0.8-2.2 mm
Color	Negro/Marrón
Dureza	7 Mohs*
Peso específico	2,4-2,6 Kg/dm <sup>3</sup>
Cloruros solubles en agua	Menos del 0,001%

**Fuente:** Ficha técnica de granalla de silicato de aluminio Eurogrit BV. Septiembre 13 del 2012 [8].

\*Mohs: La escala de Mohs es una relación de diez materiales ordenados en función de su dureza, de menor a mayor. Se utiliza como referencia de la dureza de una sustancia.

#### 4.1.1.3. Composición química:

**Tabla 2.** Composición química de la granalla de silicato de aluminio.

Compuesto	Composición (%)
SiO <sub>2</sub>	45 - 54 % dentro del límite <0,1 libre de silica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24 - 31 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7 - 11 %
CaO	3 - 8 %
K <sub>2</sub> O	2 - 5 %
MgO	2 - 3 %
TiO	0 - 2 %
Na <sub>2</sub> O	0 - 1 %
Otros	Trazas

**Fuente:** Ficha técnica de granalla de silicato de aluminio Eurogrit BV, Septiembre 13 del 2012 [8].

#### 4.1.2. Cemento Portland

##### 4.1.2.1. Definición:

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales les permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuada [9].

##### 4.1.2.2. Clasificación:

Se conocen 5 tipos de cemento portland

Tipo I: los cementos portland regulares son los productos acostumbrados en la construcción general.

Tipo II: los cementos portland que fraguan a un calor moderado y los resistentes al sulfato se emplean donde se requiere calor moderado de hidratación o para construcción en general con concreto expuesto a la acción moderada de los sulfatos.



Tipo III: Los cementos de alta resistencia rápida (ARR) se elaboran de materias primas con una relación cal-a-sílice mayor que la del cemento del tipo I y más finamente molidas.

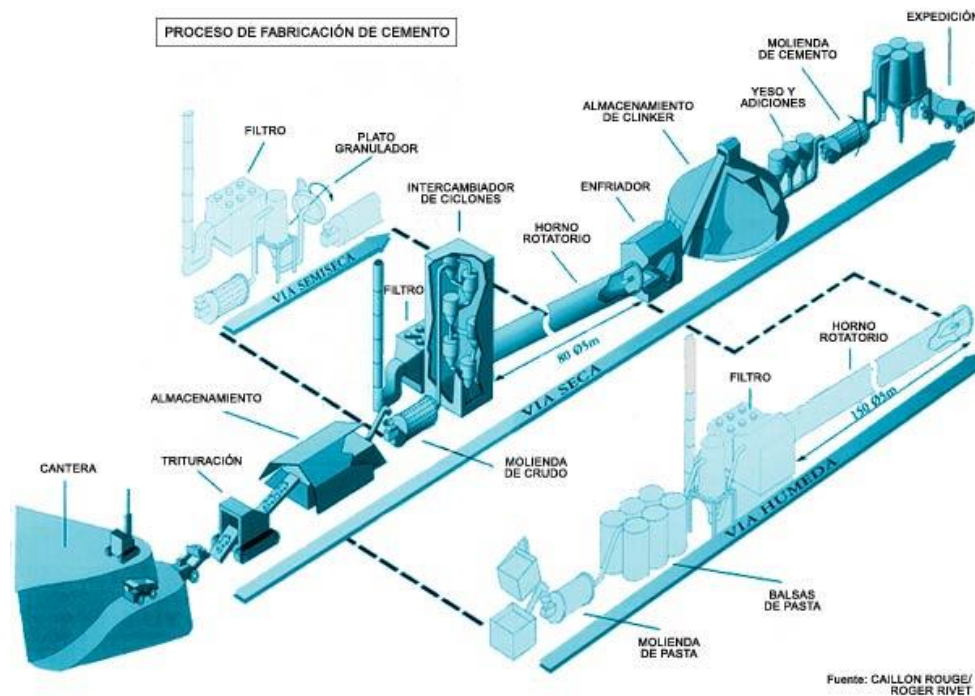
Tipo IV: Los cementos portland de bajo calor contienen un porcentaje menor de  $C_3S$  y de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), lo cual disminuye la evolución de calor.

Tipo V: Los cementos portland resistentes al sulfato comprenden los que por su composición o por su procesamiento resisten a los sulfatos mejor que los otros cuatro tipos [10].

#### 4.1.2.3. Obtención:

El cemento portland se fabrica generalmente a partir de materiales minerales calcáreos, tales como la caliza, por alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza. En ocasiones es necesario agregar otros productos para mejorar la composición química de las materias primas principales; el más común es el dióxido de titanio. [10].

**Figura 1.** Proceso de obtención del cemento portland



**Fuente:** Proceso de obtención del cemento.

[www.arquitecturamodelo.blogspot.com/search?q=cemento](http://www.arquitecturamodelo.blogspot.com/search?q=cemento)[11]. Febrero 21 de 2013.

#### 4.1.2.4. Composición química del cemento portland:

El cemento portland es un mineral formado por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos por lo cual se pueden identificar cuatro compuestos principales.

**Tabla 3.** Composición química del cemento portland

Nombre del Compuesto	Composición del oxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminio tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**Fuente:** tecnología del concreto y del mortero. Diego Sánchez De Guzmán. Septiembre 13 del 2012 [9].

#### 4.1.2.5. Finura

La finura del cemento es una característica íntimamente ligado al valor hidráulico del cemento ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0.01 mm por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta muy perjudicial); el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado; disminuye su resistencia, Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento Portland debe estar finamente molido pero no en exceso [12].

La finura de un cemento se mide por sus residuos en el tamiz#200 estandarizado por la norma ASTM E11, la cual debe tener un valor mínimo establecido por la norma NTC 226 mayor o igual a 95% [13].

Para el cálculo de la finura se utiliza la siguiente expresión

$$F = \frac{m - R}{m} \times 100 \quad (\text{Ec. 1}) \quad [13]$$

Donde,

$m$ : Peso de la muestra de cemento.

$R$ : Peso de residuos retenidos en el tamiz.

$F$ : Finura del cemento.

#### **4.1.2.6. Peso específico**

El peso específico real varia muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 2.9 y 3.15 [g/cm<sup>3</sup>]. La determinación del peso específico relativo de los cementos consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (g) y el volumen (mL) de líquido que ésta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier.

El peso específico se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Peso Específico del Cemento} = \frac{(64 \text{ g})}{(L_F - L_i)} \quad (\text{Ec. 2})$$

La diferencia entre las lecturas inicial ( $L_i$ ) y final ( $L_F$ ) representa el volumen de líquido desplazado ( $\Delta V$ ) por el peso del cemento usado en el laboratorio y ( $L_F - L_i$ ) es igual al volumen desplazado [14].

### **4.1.3. Agua**

#### **4.1.3.1. Definición:**

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello se clasifica en agua de mezclado y agua de curado [9].

#### **4.1.3.2. Clasificación:**

- **Agua de Mezclado:** está definida como la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico [9].
- **Agua de curado:** El curado puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la planta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales. Estas condiciones se refieren básicamente a la humedad y la temperatura. Por lo tanto, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento. Este suministro adicional depende de la humedad el ambiente [9].

### **4.1.4. Agregados**

#### **4.1.4.1. Definición**

Un agregado es un material inerte de forma granular, natural artificial que aglomerados por el cemento en presencia de agua conforman un todo compacto conocido como concreto o hormigón [15].

#### **4.1.4.2. Tipos de agregados:**

- **Agregados gruesos:** Los aglomerados gruesos son la porción de aglomerado que no pueden pasar a través de una criba numero 4 (4.75 mm). El aglomerado grueso normal consta de grava de mina o grava triturada. Son de consistencia fuerte y durable propicios para la elaboración del concreto. El agregado grueso consistirá en piedra

picada y cantos rodados, duros y sin costra. Deberá estar libre de materia orgánica, elementos extraños y materiales nocivos, que afecten la calidad del hormigón [16].

- **Agregados finos:** El aglomerado fino es la porción de un aglomerado que si pasa a través de una criba # 4. Por lo general, estos materiales se clasifican de modo bastante uniforme desde la criba número 4 hasta la número 100. A menos que se indique otra cosa, el aglomerado fino suele ser arena, el producto de la desintegración y abrasión natural de las rocas. Los agregados finos son esenciales para el acabado suave y dotado de textura lisa [16].

#### 4.1.4.3. Propiedades de los agregados:

##### a) Propiedades físicas:

- **Granulometría:** Se define como la distribución de los tamaños de partículas que constituye una mezcla de agregado. La granulometría se determina mediante el análisis granulométrico [17]. El agregado fino deberá estar graduado dentro de los límites siguientes:

**Tabla 4.** Porcentaje que pasa de agregado fino según la norma ASTM C33

Malla		Porcentaje que pasa
9.5 mm	3/8"	100
4.75 mm	No. 4	95 a 100
2.36 mm	No. 8	80 a 100
1.18 mm	No. 16	50 a 85
600 µm	No. 30	25 a 60
300 µm	No. 50	10 a 30
150 µm	No. 100	2 a 10

**Fuente:** Norma ASTM C33, mayo 10 del 2013 [18].

- **Análisis granulométrico:** Es la operación de separar una mezcla de agregado en fracciones de igual tamaño haciendo pasar está a través de una serie de tamices de aberturas cuadradas. La denominación de los tamices anteriormente se hacía teniendo en cuenta el tamaño de la abertura por pulgadas lineal para tamices menores de 1/8 de pulgada. Hoy en día, la designación se hace de acuerdo con la abertura de la malla, medidas en milímetros o micras [17].
- **Módulo de finura:** Es un factor empírico que permite estimar que tan fino o grueso es un material. Está definido como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie “estándar” que cumple la relación 1:2, desde el tamiz de 149 (No. 100) en adelante, hasta el máximo tamaño que se encuentre, dividido por 100 [17].
- **Tamaño máximo:** Se define como la abertura del menor tamiz de la serie que permite el paso del 100% de la muestra ensayada. Este valor indica el tamaño de la partícula más grande que hay dentro de la masa de agregado y es de interés conocerla ya que el tamaño del agregado debe ser compatible con las divisiones de la estructura [17].
- **Tamaño máximo nominal:** Se define como la abertura del matiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea mayor o igual al 15%. El tamaño máximo nominal muestra más claramente el tamaño de las partículas más grande de la masa de agregados en su fracción gruesa [16].
- **Gravedad específica aparente:** Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua, libre de gas, a la misma temperatura [19].
- **Gravedad específica bulk:** Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura [19].
- **Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca (SSS):** Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión

durante 15 horas (pero sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura [19].

- **Absorción de agua:** Es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado, después de una hora de secado a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ [19].

$$\% \text{ absorción} = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

$P_{sss}$  = peso de la muestra saturada y superficialmente seca

$P_s$  = peso seco de la muestra.

- **Peso volumétrico (masa unitaria):** Está definido como la relación existente entre el peso de una muestra de agregado y el volumen que ocupa dicho agregado en un recipiente de volumen conocido. La masa unitaria de un agregado indica de manera general la calidad de este y su aptitud para ser utilizado en la fabricación de concreto [16].

#### 4.1.5. Concreto fresco y endurecido.

**4.1.5.1. Concreto fresco:** es un material compuesto, comúnmente llamado pasta que está conformada por cemento, agregados finos y gruesos, agua y otros aditivos; algunas de las pastas pueden contener aire [9].

##### a.) Propiedades del concreto fresco:

- **Manejabilidad o trabajabilidad:** la definición propuesta por Glanville, Collins y Matthews nos dice que “la trabajabilidad se puede definir mejor como la cantidad de trabajo interno útil que se requiere para producir una compactación total”, esta definición originada del supuesto que solo la fricción interna (esfuerzo de fluencia), es una propiedad intrínseca de la mezcla nos brinda una aproximación cuantitativa de la trabajabilidad, sin embargo define un estado ideal de compactación total la cual nunca se logrará, una corrección bastante simple a esta definición es la que a continuación proponemos, “la trabajabilidad se puede definir como la cantidad de trabajo interno útil que se requiere para producir una compactación adecuada de la mezcla”[9].

- **Relación agua-cemento:** En términos generales, la resistencia del concreto se determina por la cantidad neta de agua utilizada por cantidad unitaria de cemento, para un conjunto dado de materiales y de condiciones. Esto es lo que se conoce hoy en día como la relación "agua-cemento", la cual está dada en peso. A partir de lo anterior fue que DuffAbrams, en el año de 1918, formuló su conocida ley, según la cual, para los mismos materiales y condiciones de ensayo, la resistencia de un concreto completamente compactado, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua-cemento (la cual originalmente se expresaba en volumen).

Para cuantificar esto, Abrams propuso la siguiente expresión de tipo exponencial:

$$R = \frac{A}{B^\alpha} \text{ (Ec. 4)}$$

Donde,  $R$  es la resistencia media a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$ .  $A$  y  $B$  son constantes empíricas que dependen de la calidad y tipo de cemento, las propiedades de los agregados, los aditivos, y las condiciones de ensayo.  $\alpha$  es la relación agua-cemento en peso.

Otra forma de expresar la ecuación es tomando logaritmos, con lo cual quedaría de la siguiente manera:

$$\log R = \log A - \alpha \log B \text{ (Ec. 5)}$$

Correspondiendo entonces a la ecuación de una recta cuyas variables son el  $\log R$  y  $\alpha$  [9].

**4.1.6. Concreto endurecido:** Es el material obtenido (piedra artificial), después de un riguroso proceso de diseño, el cual debe cumplir con los requerimientos especificados por el constructor [9].

**a.) Propiedades mecánicas del concreto endurecido:**

- **Resistencia a la compresión:** esta es la característica principal del concreto, la forma de expresarla es en términos de esfuerzo, generalmente en  $\text{Kg/cm}^2$ . La forma de evaluar esta resistencia es mediante una prueba mecánica de compresión que consiste en aplicar una carga de compresión axial a cilindros moldeados o corazones de concreto, a una tasa predeterminada, hasta que la falla ocurre; esta prueba está



contemplada en la norma ASTM C 39. La fuerza compresiva del espécimen es calculada al dividir la carga máxima lograda durante la prueba entre el área calculada del espécimen [20].

**Tabla 5.** Aumento promedio de la resistencia a la compresión del concreto, con el tiempo, para varios cementos Tipo I colombianos.

Cemento	Edad (días)	Porcentaje de Resistencia respecto a los 28 días						
		1	3	7	14	28	56	90
Argos		9-14	35-47	60-67	80-84	100	116-120	128-134
Boyacá		11-14	33-43	58-64	79-82	100	118-121	130-135
Cairo		24-27	38-49	62-69	81-84	100	115-116	126-127
Caldas		10-19	36-46	60-66	80-83	100	117-120	128-134
Caribe		17-32	44-55	65-72	83-86	100	114-117	124-129

**Fuente:** Tecnología del concreto Diego Sánchez Guzmán. Mayo 10 del 2013 [9].

- **Resistencia a la tracción indirecta:** la tracción se define como un esfuerzo interno que hace el material en dicho caso el concreto que se somete a dos fuerzas con sentidos opuestos. La forma de evaluar esta propiedad es mediante un ensayo de tracción el cual está contemplado en la norma ASTM C293 o análogamente por la norma colombiana I.N.V. E – 411 – 07 “Ensayo de tracción indirecta de cilindros normales de concreto” [21].

El ensayo de tracción indirecta destaca por ser un método simple y representativo que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener carga máxima que aguanta una mezcla antes de romperse [22]. Por lo general en los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia la tracción indirecta son del 8 al 12% de la resistencia a la compresión [9]

El esfuerzo de tracción indirecta del cilindro se calcula mediante la siguiente ecuación

$$T = \frac{2P}{\pi L d} \text{ (Ec. 6)}$$

Dónde:

T = Esfuerzo de tracción indirecta, kPa (lb/pulg<sup>2</sup>)

.P = Carga máxima indicada por la máquina de ensayo, kN (lbf).

L = Longitud del cilindro, m (pulg).

d = Diámetro del cilindro, m (pulg).

- **Resistencia a la flexión:** La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión [9].

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$MR = \frac{PL}{bb^2} \text{ (Ec. 7)}$$

Dónde:

MR: Es el módulo de ruptura, en (kgf/cm<sup>2</sup>).

P: Es la carga máxima aplicada, en N (kgf).

L: Es la distancia entre apoyos, en cm.

b: Es el ancho promedio del espécimen, en cm.

d: Es al peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la ruptura se presenta fuera del tercio medio del claro, en no más del 5% de su longitud, se calcula el módulo de ruptura como sigue:

$$MR = \frac{3Pa}{bd^2} \text{ (Ec. 8)}$$

Dónde:

a: es la distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga en cm.

Por otra parte, el ensayo descrito por la norma ASTM C-293 consiste en apoyar las vigas de igual forma que en la norma ASTM C-78, pero con aplicación de carga en el

centro de la luz. En este caso, el módulo de rotura se calcula según la siguiente expresión:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ (Ec. 9)}$$

El módulo de rotura del concreto es una medida útil para el diseño de pavimentos de concreto, puesto que las placas del pavimento trabajan principalmente a flexión; de ahí que en estos casos, la calidad del concreto se especifique indicando su módulo de rotura [18].

## **4.2 ANTECEDENTES**

Debido a la escasa información proporcionada en la literatura de investigaciones realizadas con la granalla de silicato de aluminio, los antecedentes se enfocan a los diferentes estudios relacionados al uso de materiales suplementarios para el mezclado con concreto, el cual desde mucho tiempo atrás ha presentado problemas como la corrosión, alta densidad y la fragilidad, entre otros; los cuales son una razón suficiente para que surjan nuevas ideas que superen estas dificultades para la búsqueda de una solución factible [24]; a partir de aquí se han desarrollado muchos estudios relacionados al mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto y la modificación de algunos parámetros, como los agregados que hacen parte de este material [25].

Las fibras de acero con concreto han sido utilizadas para la determinación del esfuerzo a la tensión y la formulación de teorías de predicción sobre la resistencia a la tracción [24]. Su uso reduce la deflexión de concreto reforzado con este material, lo que significa una mejor ductilidad [25], ofreciendo una mayor resistencia a la deformación partir de los años 80s, comenzó una creciente demanda de minerales agregados al cemento en las industrias del concreto. Por varias razones, se espera que aumente más la demanda futura de estos materiales. En China se produce cerca de 200 millones de toneladas de cemento al año, se consumen aproximadamente 15 millones de toneladas de zeolita, 25 millones de toneladas de escoria de alto horno, y más de 10 millones de toneladas de cenizas volantes como materiales

suplementarios en la fabricación de concreto, actualmente esta cifra sigue aumentando a nivel mundial [26].

Muchos procesos aplicados al concreto están relacionados con la impregnación con materiales poliméricos, como las resinas epóxicas que ofrecen ventajas económicas y una fuerte adhesión al concreto comparados con otros materiales, el uso de este material surgió debido a que el concreto presenta un deterioro muy acelerado en ambientes marinos, por las altas temperaturas durante el verano y el contacto de éste con agua salada; además el concreto reforzado con acero se desgasta aceleradamente y se quebranta, como producto de la corrosión; este hormigón deteriorado se repara normalmente utilizando resinas epóxicas, las cuales le proporcionan al concreto una mayor durabilidad en comparación a un concreto sin refuerzo[27, 28].

Otros materiales poliméricos como las fibras de nylon y de polipropileno han sido empleados en el concreto con el fin de solucionar la debilidad a la tensión y a la penetración de agentes como el bromo y los sulfatos ácidos presentes en el ambiente, se encontró que a contenidos de fibra de nylon de  $0.6 \text{ kg/m}^3$ , las propiedades mecánicas mejoran significativamente en comparación a los hormigones con fibras reforzadas de polipropileno. Además, la reducción de la grieta por contracción también mejoró para el mortero reforzado con fibra de nylon. Las muestras reforzadas con fibras de nylon registraron una resistencia a la tracción más alta, probablemente por una adecuada distribución en el hormigón [29].

Actualmente, con el fin de obtener un concreto de alta durabilidad se incorporan materiales suplementarios tales como el humo de sílice, las cenizas volantes y ceniza de cáscara de arroz. Estos materiales conducen a una reducción en su porosidad, por lo que a su vez, conduce a una menor permeabilidad y al aumento de la durabilidad del concreto [30]. Las cenizas volantes ultra finas son el material suplementario más utilizado, estudios indican que este tipo de aditivo mineral mejora la fluidez del concreto y la resistencia a la compresión, cuando se reemplaza en un 30 a 70 % del peso total del cemento, además se estima que el concreto baja sus costos debido a que el consumo de cemento se reduce [31]. Además de los materiales suplementarios mencionados anteriormente, existen las puzolanas estas tienen propiedades

cementantes y contribuyen al mejoramiento de la durabilidad del hormigón investigaciones han utilizado el alumino-silicato en concreto, este material reduce la permeabilidad significativamente cuando es incorporado al hormigón, aumentando su durabilidad. El alumino-silicato se tomó como sustituyente en un 10% en peso del cemento empleado en el diseño de mezcla para evaluar sus propiedades como la resistencia a la compresión, a la flexión, a la tracción, congelación y descongelación, además de la resistencia a la penetración de iones cloruros. Los resultados indican que el alumino-silicato es un material altamente puzolanico y puede ser empleado para obtener un concreto de alto rendimiento pero en estas mezclas hay que adicionar más superplastificante, estos son aditivos capaces de mejorar las propiedades del concreto como la trabajabilidad, en comparación a la mezcla de concreto sin sustituciones [1].

Los residuos de vidrios como agregados gruesos han sido usados para la evaluación de las propiedades mecánicas del concreto. Sin embargo, su incorporación falló debido a que los residuos no tienen un efecto significativo sobre la trabajabilidad y reduce la resistencia a la compresión, aunque los costos de producción del concreto son bajos [32]. Además, fueron utilizados desechos no reactivos como arcilla y carbón negro (coque) en el concreto. El carbón negro es un producto de relleno para mejorar la resistencia a la rigidez, desgaste, dureza y resistencia al calor; el carbono tiene un efecto retardante en la configuración y en el proceso de endurecimiento del concreto, esto es una gran ventaja en su trabajabilidad, porque puede reducir la relación agua/cemento y funciona como un superplastificante [33].

### **4.3 ESTADO DEL ARTE**

La gestión de residuos en los procesos industriales se está convirtiendo cada día más en un problema global y se prevé que con los años adquiera mayor importancia por el aumento incesante de la población mundial [2], es por ello que se plantean alternativas para aprovechar la variedad de residuos generados y mitigar sus efectos negativos al medio ambiente.

Es así como trozos triturados de concreto reciclado han sido utilizados como áridos gruesos para la fabricación de un nuevo concreto. Cuatro composiciones de agregados gruesos reciclados, 0%, 25%, 50% y 100%, han sido evaluadas, con el fin de obtener altas resistencias a la compresión. Sin embargo, los resultados no fueron los esperados debido a que el hormigón fabricado con áridos gruesos reciclados provenientes del concreto, requiere gran cantidad de cemento para conseguir una alta resistencia a la compresión y por lo tanto no es una propuesta viable económicamente. Estos agregados reciclados se deben utilizar en hormigones cuando se requiere una baja o- media resistencia a la compresión (20-45 MPa) [34]. Estudios relacionados con este mismo material, utilizando además limallas, provenientes de reciclaje y de la industria metalmecánica respectivamente, han sido desarrollados con el objetivo de estudiar los cambios en las propiedades mecánicas del concreto. Cinco mezclas se prepararon a diferentes composiciones, la primera consistía en la sustitución del 10% de escombros con relación a la arena, la segunda es el 10% de escombros en el triturado, la tercera muestra consistía en 6% y 10 % de limalla y escombros respectivamente, con respecto al triturado; la cuarta tiene porcentajes iguales a los anteriores pero con respecto a la arena, y la quinta es la muestra patrón, es decir, sin ningún tipo de aditivo. Los resultados obtenidos reflejaron que las mezclas tres y cuatro superaban las resistencias a la compresión en comparación a la mezcla de concreto sin aditivos, concluyendo que este tipo de concreto permite aprovechar hasta  $0.07 \text{ m}^3$  de escombros por cada metro cúbico de concreto producido, reduciendo el uso de agregados vírgenes (arena y triturado) lo que permite mitigar el efecto ambiental generado por la sobre explotación de estos recursos no renovables [35].

Las escorias de alto horno y de horno eléctrico, producto de la fundición de minerales de hierro y acero respectivamente, han sido empleadas en concreto. Esta investigación se realizó en tres fases en las cuales se variaba la relación de agua/cemento, se emplearon diferentes dosificaciones de mezcla y además se midieron las propiedades mecánicas en tiempos de 7, 14 y 28 días; dando como resultado, que en los hormigones fabricados con escorias de alto horno, entre mayor sea el porcentaje de sustitución de éste en el concreto, menor es la densidad del hormigón comparado con el concreto patrón. En cuanto al hormigón fabricado con escoria de horno eléctrico, entre mayor es el porcentaje de sustitución, mayor es la

densidad del hormigón. Además los hormigones con escoria de horno eléctrico proporcionan una mejora a las propiedades mecánicas en comparación a los hormigones mezclados con escoria de alto horno pero los hormigones sin porcentajes de escorias tienen un mejor comportamiento de tracción frente a los hormigones compuestos [2].

Concretos fabricados con vidrio reciclado han sido evaluados para verificar la influencia de la temperatura sobre las condiciones de curado de concreto, se expusieron las diferentes mezclas a cuatro temperaturas elevadas de 300°C, 500°C, 600 °C y 800 °C; se prepararon cinco mezclas de concreto con vidrio reciclado en donde se reemplazó por el agregado fino con porcentajes de 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Después de la exposición a las temperaturas elevadas se determinó la pérdida de masa de concreto, la densidad, la porosidad al agua, la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) y la capacidad de absorción de agua. Luego se llevó a cabo una prueba de resistencia a la compresión. La incorporación de vidrio reciclado en concreto ayudó a mantener las propiedades del hormigón después de la exposición a altas temperaturas por la fusión y solidificación del vidrio reciclado en la matriz del concreto [36].

Las cenizas de cascaras de arroz han sido utilizadas con concreto autocompactante de alto rendimiento, el cual es un concreto altamente fluido sin segregación que puede ser extendido en un sitio con facilidad y sin necesidad de vibración. El contenido de las cenizas de cascaras de arroz, provenientes del tratamiento térmico convencional que se aplica en un rango de temperatura de 500-800°C, se variaron de 0 a 30% con relación al peso del cemento, la relación agua/ cemento de 0.3, 0.35, 0.4 y 0.5; además el contenido de aire atrapado de 2% y 6%. Los ensayos de la resistencia a la compresión a un tiempo de 3, 7, 28 y 56 días se determinaron de acuerdo a la norma ASTM C39, se midió la velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica a la edad de 28 y 56 días; los resultados obtenidos indicaron que al aumentar el contenido de las cenizas de cascaras de arroz y con la menor relación agua/cemento mejoran las propiedades en estado endurecido, además se concluyó que la resistencia a la compresión disminuye por contenido mayor de aire atrapado [37].

La estabilización- solidificación es una nueva tecnología para minimizar la acumulación y el aprovechamiento de residuos sólidos peligrosos industriales, la cual consiste en mezclar los

residuos contaminados con un material aglomerante que comúnmente es el cemento, este proceso impide que los químicos se dispersen hacia el medio ambiente y los hace menos nocivos para la salud humana, estudios relacionados se han enfocado a los desechos industriales metálicos como el cadmio +2, cromo+3, níquel y plomo procedentes de las aguas residuales de algunas industrias, a estos metales se le aplicó la técnica de estabilización-solidificación mediante una matriz de concreto, evaluando las propiedades mecánicas de las muestras y posteriormente un análisis de absorción atómica y PECT, estas últimas pruebas son empleadas para verificar el grado de toxicidad y de contaminación que pueden tener los residuos peligrosos luego de mezclarlos con concreto, los resultados arrojados muestran que la resistencia a la compresión aumenta en concretos modificados con los metales comparados con un concreto convencional y los índices de peligrosidad de los lixiviados son bajos, el cadmio en esto dos parámetros evaluados presenta un mejor comportamiento comparado con los otros metales [7].

La anterior información está enfocada a los residuos sólidos industriales y materiales que han sido suplementarios o adicionados en las mezclas de concreto porque en la literatura no se encuentran estudios relacionados con el residuo de granalla de silicato de aluminio, específicamente. Por esta razón no es posible comparar los resultados obtenidos en la presente investigación con otros estudios relacionados con el residuo de granalla de silicato de aluminio. Este proyecto propone la utilización del residuo de granalla de silicato de aluminio en la obtención de concreto para contribuir al aprovechamiento de los residuos generados en los procesos industriales y mitigar los efectos negativos que estos ocasionan en el medio ambiente. Los residuos de granalla de silicato de aluminio proviene de un material puzolanico es decir que tiene propiedades cementantes y además por su granulometría es muy similar a la del agregado fino, por ello se pronostica que las propiedades mecánicas del hormigón compuesto (residuo de granalla de silicato de aluminio-concreto) presentaran un mejor comportamiento comparado con un hormigón normal.



## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación desarrollada es de enfoque cuantitativo de diseño experimental y de tipo aplicada, porque se analizó el efecto del periodo de resistencia y el porcentaje en peso del residuo de granalla de silicato de aluminio en la arena, sobre las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción, verificando así el comportamiento del concreto para encontrar a partir de los resultados las mejores condiciones en la obtención de un concreto de alto rendimiento. La ejecución del proyecto tuvo una duración de tiempo aproximado de 12 meses desde la recopilación de información hasta la elaboración del informe final, la investigación y las condiciones de trabajo están bajo las características ambientales de la ciudad de Cartagena.

### **5.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **5.2.1. Fuentes de recolección primaria:**

Las fuentes de recolección primaria que permitieron el desarrollo del trabajo de grado, fueron los datos obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión, tracción y flexión realizadas a las muestras, también hacen parte de este tipo de fuente de investigación los datos determinados en las pruebas fisicoquímicas que ayudaron a realizar el diseño de mezcla de concreto y además los costos de operación para analizar los beneficios económicos.

#### **5.2.2. Fuentes de recolección secundaria:**

Las fuentes secundarias que permitieron recolectar información, fueron las bases de datos de la Universidad de Cartagena, tales como, ScienceDirect, Scopus, EBSCO Host, EngineeringVillage, revista científica Virtual Pro, donde se encontraron artículos científicos importantes que relacionaban en su mayoría, la variedad de aditivos que son usados en el concreto para mejorar sus propiedades mecánicas, también hacen parte de este tipo de fuente los informes de las pruebas de difracción de rayos X y de microscopia electrónica de barrido

(SEM) que fueron suministrados por la compañía que almacena el residuo de granalla de silicato de aluminio.

### 5.3. VARIABLES

#### 5.3.1. Variables independientes

El periodo de resistencia y el porcentaje en peso del residuo de granalla de silicato de aluminio en la arena son definidas como variables independientes. En la tabla 6 se muestra su identificación, como también su indicador. Los niveles considerados fueron 7, 14 y 28 días para el periodo de resistencia; y los porcentajes en peso del residuo de la granalla de silicato de aluminio en la arena fueron considerados en 4 niveles 0%, 10%, 30%, 50%.

**Tabla 6.** Variables independientes.

Tipo de variable	Variable	Definición	Indicador	Nomenclatura
<b>Variable Independiente</b>	Periodo de tiempo	Tiempo en el cual se mide la resistencia al concreto	Días	Días
	Sustitución en porcentaje	Cantidad de residuo que se sustituye por la arena	Kilogramos	Kg

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación, mayo 16 del 2013.

#### 5.3.2. Variables dependientes

Las variables dependientes, las cuales son mostradas en la tabla 7, son la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión, ya que estas dependen del periodo de resistencia y del porcentaje de sustitución.

**Tabla 7.** Variables dependientes.

<b>Tipo de variable</b>	<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Indicador</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>Variable Dependiente</b>	Resistencia a la compresión	Máximo esfuerzo que puede soportar un material bajo una carga de deformación.	<i>Pounds per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada)	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
	Resistencia a la tracción	Máximo esfuerzo que intenta estirar un cuerpo antes de romperse.	<i>Pounds per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada)	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
	Resistencia a la flexión	Esfuerzo máximo de la fibra desarrollado en una probeta justo antes de que se agriete o se rompa en un ensayo de flexión.	<i>Pounds per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada)	Psi (lbf/in <sup>2</sup> )

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación, mayo 16 del 2013.

### 5.3.3. Variables Intervinientes

Se definen como las variables intervinientes, el peso de cemento y el peso de los agregados gruesos (grava triturada), los cuales fueron constantes en todas las muestras realizadas para solo determinar el efecto del periodo de resistencia y del porcentaje en peso del residuo de granalla de silicato de aluminio en la arena sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. En la tabla 8 se muestran estas variables con su respectiva definición.

**Tabla 8.** Variables Intervinientes.

Tipo de variable	Variable	Definición	Indicador	Nomenclatura
Variable Intervinientes	Peso del cemento	Cantidad de cemento requerido en cada muestra.	Kilogramos	Kg
	Peso del agregado grueso	Cantidad de agregado grueso requerido en cada muestra.	Kilogramos	Kg

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación, mayo 16 del 2013.

#### **5.4. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN:**

El diseño experimental fue un diseño multifactorial, con dos factores (periodo de resistencia y sustitución en porcentaje en peso de residuo de granalla de silicato de aluminio en arena) El diseño experimental multifactorial para cada una de las variables dependientes se explica a continuación:

Para la resistencia a la compresión (variable dependiente), considerando para el periodo de resistencia los niveles de 7, 14 y 28 días; para la sustitución en porcentaje en peso los niveles son 0%, 10%, 30% y 50%, por lo tanto el resultado del diseño multifactorial es  $1 \times 3 \times 4 = 12$  muestras y con una réplica cada muestra resulta un total  $12 \times 2 = 24$  muestras.

Para la resistencia a la tracción (variable dependiente), considerando para el periodo de resistencia los niveles de 7, 14 y 28 días; para la sustitución en porcentaje en peso los niveles son: 0%, 10%, 30% y 50%, por lo tanto el resultado del diseño multifactorial es  $1 \times 3 \times 4 = 12$  muestras y con una réplica cada muestra resulta un total  $12 \times 2 = 24$  muestras

Para la resistencia a la flexión (variable dependiente), considerando para el periodo de resistencia un nivel de 28 días; para la sustitución en porcentaje en peso los niveles son 0%, 10%, 30% y 50%, por lo tanto el resultado del diseño multifactorial es  $1 \times 1 \times 4 = 4$  muestras y con una réplica cada muestra resulta un total  $4 \times 2 = 8$  muestras.

En las Tablas 8, 9 y 10, se muestra detalladamente las especificaciones del diseño experimental para cada una de las variables dependientes, el cual se soportó por el programa STATGRAPHICS CENTURION (Ver Anexo A).

**Tabla 9.** Resumen detallado de las muestras para ensayo a la compresión.

<b>Periodos de resistencia (Días)</b>			
<b>Sustitución del residuo en la arena en peso (%)</b>	7	14	28
	<b>Número de cilindros para la compresión</b>		
<b>0</b>	2	2	2
<b>10</b>	2	2	2
<b>30</b>	2	2	2
<b>50</b>	2	2	2
<b>Subtotal</b>	8	8	8
	<b>Total</b>		<b>24</b>

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 10 de 2013

**Tabla 10.** Resumen detallado de las muestras para ensayo a la tracción.

<b>Periodos de resistencia (Días)</b>			
<b>Sustitución del residuo en la arena en peso (%)</b>	7	14	28
	<b>Numero de cilindros para la tracción</b>		
<b>0</b>	2	2	2
<b>10</b>	2	2	2
<b>30</b>	2	2	2
<b>50</b>	2	2	2
<b>Subtotal</b>	8	8	8
	<b>Total</b>		<b>24</b>

**Fuente:** Elaboración en la presente investigación. Mayo 10 de 2013

**Tabla 11.** Resumen detallado de las muestras para ensayo a la flexión.

<b>Periodos de resistencia (28 Días)</b>	
<b>Sustitución del residuo en la arena en peso (%)</b>	<b>Numero de cilindros para la flexión</b>
<b>0</b>	2
<b>10</b>	2
<b>30</b>	2
<b>50</b>	2
Total	8

**Fuente:** Elaboración en la presente investigación. Mayo 10 de 2013

En conclusión, se realizaran 56 muestras incluyendo una réplica por cada muestra.

## **5.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LA MATERIA PRIMA DEL CONCRETO**

### **5.5.1. Ensayos de laboratorio sobre el Cemento Portland tipo I marca Argos**

Los ensayos realizados al cemento fueron la determinación de la finura y del peso específico (ver Anexo B), se escogió este tipo de cemento por su economía y además por ser el más utilizado a nivel de la construcción; El pesado de las muestras se hizo con una BALANZA OHAUS SCOUT® PRO modelo SP4001 OHAUS con una capacidad 4000g y 0,1g de sensibilidad.

#### **5.5.1.1. Ensayo para la determinación de la finura del cemento**

El ensayo para la determinación de la finura del cemento se aplicó de acuerdo a las normas ICONTEC 226 - INV E155 - ASTM C184. El tamizado en muestras de 50 gramos de cemento se utilizó con una malla número No.200, una vasija limpia, y una balanza analítica. El procedimiento consiste en hacer pasar una muestra de 50 gramos a través del tamizador en un tiempo dado, de 5 a 10 min, hasta que no pase más de 0.05 g a través del tamiz o la máxima cantidad de cemento ha atravesado la malla. El residuo que queda en el tamiz es

transferido a una vasija limpia para ser pesada obteniendo el porcentaje de finura promedio del cemento al repetir el procedimiento anterior para 3 muestras de 50 gramos cada una [13].

#### **5.5.1.2. Ensayo de peso específico del cemento**

El peso específico del cemento se determinó mediante las normas NTC 221 - INV 162 – ASTM C188 de la siguiente manera:

Se llenó un frasco de Le CHATELIER con Kerosene hasta un punto entre 0 y 1 ml asegurándose que por encima de este nivel interior quedara seco, esta lectura fue  $L_i$  (lectura Inicial). Luego, se agregó 64 gramos de Cemento Portland tipo I en pequeñas cantidades, teniendo cuidado de no derramar el líquido ni untar las paredes de cemento por encima del nivel. Se colocó el frasco en baño de María, adicionando hielo para alcanzar la temperatura ambiente de 21°C. Por último, se tomó la lectura final  $L_F$ . La diferencia entre las lecturas final e inicial representará el volumen de líquido desplazado por la masa del cemento [38].

#### **5.5.2. Ensayos de laboratorio sobre el agregado grueso (grava triturada)**

Los ensayos realizados a los agregados gruesos (grava triturada), provenientes de las canteras de Turbaco, fueron gravedad específica, absorción de agua y granulometría (ver Anexo A); el equipo utilizado para el pesado de las muestras es el mismo especificado en los ensayos sobre el cemento.

##### **5.5.2.1. Ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso**

Para el agregado grueso utilizamos la norma ICONTEC 176 – INV E12 – ASTM C127, el ensayo se realizó de la siguiente manera:

Se escogió una muestra representativa de agregado grueso, procediendo a lavarlo para eliminar el polvo y material adherido a la superficie, a continuación se sumergió en agua por un tiempo de 24 horas, posteriormente se decantó superficialmente el agua, los agregados fueron sumergidos en una canasta para determinar el peso saturado sumergido, luego fueron secados los fragmentos de grava para eliminar las partículas visibles de agua en la superficie y se calculó el peso saturado superficialmente seco. Por ultimo, la muestra se sometió a un horno para determinar su peso seco en el aire [19].

### **5.5.2.2. Ensayo de granulometría para los agregados gruesos**

Las normas que fueron utilizadas son la norma: ICONTEC 77- INV E16 – ASTM C136, Primero se escogió una muestra representativa, estos fueron depositados en una superficie limpia tomando una cantidad de 1000 g. aproximadamente, posteriormente fueron lavados para eliminar cualquier tipo de impureza y secados en un horno. Por último, la muestra se hizo pasar por la serie de tamices estandarizados de acuerdo a la norma ASTM E-11, con tamaños de abertura de 1 ½” - 1” - ¾” - ½” - 3/8” - N° 4, estos fueron colocados en la maquina tamizadora por 15 minutos, posteriormente se pesó la cantidad que quedó retenida en cada tamiz [39].

### **5.5.3. Ensayo de laboratorio sobre el agregados fino (arena)**

Los ensayos realizados al agregado fino (arena), proveniente de Rotinet- Atlántico, fueron densidad, absorción de agua y granulometría (ver Anexo B); la balanza utilizada es la misma especificada en los ensayos anteriores.

#### **5.5.3.1. Ensayo de densidad y absorción de agua del agregado fino**

Para determinar la densidad y la absorción de agua del agregado fino se utilizaron las normas ICONTEC 237 – INV E22 – ASTM C128, en el ensayo, primero se escogió una muestra representativa que fue sumergida totalmente en un recipiente con agua durante 24 horas para que esta se saturara, luego se depositó sobre una superficie metálica (no absorbente), que fue expuesta a una corriente de aire caliente agitándola con frecuencia para conseguir un secado uniforme de la muestra, esta operación se dio por terminada cuando las partículas del agregado fino estuvieron sueltas.

A continuación, la arena se colocó en un molde cónico, se dejó caer libremente un pisón sobre la superficie de ésta, desde una altura de un centímetro, 25 veces aproximadamente. Luego, se alisó la superficie de la muestra y se alzó el molde verticalmente sin girarlo. El cono formado por la muestra se derrumbó parcialmente al separar el molde. Esto indicó que se ha alcanzado una condición de material saturado con su superficie seca.



De la muestra se tomó 500 gramos que se introdujeron en un Picnómetro, se llenó con agua hasta su menisco eliminando las burbujas de aire, se procedió a pesar el picnómetro con muestra, por último, se extrajo dicha muestra secándola en un horno para determinar su peso seco en el aire [40].

#### **5.5.3.2. Ensayo de granulometría del agregado fino**

Para realizar la granulometría de la arena, se empleó la misma norma utilizada en el agregado grueso y por lo tanto el mismo procedimiento. Sin embargo, la muestra representativa fue de 500 g y los tamices utilizados para el agregado fino, según la norma ASTM- E11 [41], fueron N°4- N°8- N°16- N°30- N°50- N°100 y N°200.

### **5.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.**

Para la caracterización fisicoquímica del residuo de granalla de silicato de aluminio, se realizaron los ensayos de densidad, absorción de agua y granulometría (ver Anexo B), utilizando las mismas normas aplicadas a los agregados finos y por lo tanto el mismo procedimiento. Esto con el fin de comparar los resultados, debido a que el residuo se sustituirá por la arena.

Además se analizaron los resultados de los ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM) y de difracción de rayos X (ver Anexo C), que fueron suministrados por la compañía que almacena los residuos, los anteriores ensayos nos ayudaron a conocer la composición química y grado de cristalinidad del residuo.

### **5.7. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO**

Para el diseño de la mezcla de concreto se tomó como referencia el método propuesto por el Instituto Americano del Concreto (ACI), en la norma 211.1-70, con el siguiente procedimiento [42]:

Primero se seleccionó el asentamiento máximo (depende de la consistencia que se desee en la mezcla) y el tamaño máximo del agregado de grueso, luego se estimó el contenido de aire y agua, con estos parámetros se determinó la resistencia del diseño y se seleccionó la relación

agua- cemento, calculando el contenido de cemento; por último la proporción de los agregados se determinó y se ajustó la mezcla de prueba.

### **5.8. ELABORACIÓN Y CURADO DE LAS MUESTRAS (PROBETAS Y VIGUETAS)**

Para la elaboración de los cilindros y viguetas se utilizó el procedimiento establecido en la norma ASTM C31 [43], los moldes empleados fueron de hierro, estos se cubrieron de una capa interna de aceite mineral para que el concreto no se pegara a las paredes del molde.

Los tamaños de las muestras establecidos por la norma son: 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de largo para los moldes cilíndricos empleados en las pruebas de compresión y tracción indirecta; para la prueba de flexión se emplean las viguetas de 15 cm de ancho y 30 cm de largo. De acuerdo a los valores obtenidos en el diseño de mezcla, se procedió a pesar cada uno los elementos que conforman el concreto. Primero se mezclaron los agregados y luego el cemento, el agua fue agregada en la proporción que se obtuvo en dicho diseño. A continuación se presenta un resumen del procedimiento del llenado de las probetas y viguetas:

- a. Luego de preparar la mezcla de concreto, se llenó el molde en tres capas de igual volumen. En la última capa, se agregó la cantidad de hormigón suficiente para que el molde quedara lleno después de la compactación. Se ajustó el sobrante del hormigón con una porción de mezcla, completando el número de golpes faltantes.
- b. Cada una de las tres capas se compactó con 25 penetraciones a 1 pulgada (25mm) utilizando la punta semiesférica de la varilla.
- c. Después de compactar cada capa, se golpearon los lados del molde ligeramente de 10 a 15 veces con el mazo para liberar las burbujas de aire que quedaron atrapadas.
- d. Por último se enrasó el exceso de hormigón con la varilla de compactación.

Para el curado inicial de las probetas se mantuvo la temperatura de los moldes en un rango de 16 a 27 °C, Al terminar el curado inicial después de 24 horas se procedió a extraer los cilindros y las viguetas de sus moldes, luego éstas se introdujeron en la piscina del laboratorio para completar su etapa de curado, es decir, se almacenaron los cilindros y viguetas en condiciones de humedad adecuada, y siempre cubiertos con agua a una temperatura de 23°C.

## **5.9. ENSAYOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS:**

Se realizaron las pruebas de compresión, tracción y flexión según lo especificado en las normas ASTM C39, INV. E-411-07, INV. E-415-07 respectivamente.

### **5.9.1. Ensayo de resistencia a la compresión:**

En la prueba de resistencia a la compresión se usó la máquina de ensayo universal marca TINIUS OLSEN (ver Anexo B), los cilindros se secaron superficialmente tan pronto fueron sacados de la cámara de curado, después se llevaron los cilindros a la máquina universal, colocados de manera vertical, a estos se le adicionaron unas bandas de neopreno en la parte inferior y superior de tal forma que se permitiera ver un haz de luz entre la máquina y las bandas con las probetas. Por último, se empezó a operar la máquina y el tablero electrónico midió la fuerza aplicada cuando se produjo la ruptura del cilindro [20].

### **5.9.2. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta**

Al igual que en el ensayo a la compresión, se sacaron los cilindros de la piscina, estos fueron secados superficialmente, después colocados en la máquina universal marca TINIUS OLSEN, de manera horizontal y se colocaron dos platinas de hierro para el contacto con la máquina (ver Anexo B). Por último, se empezó a operar la máquina y el tablero electrónico midió la fuerza aplicada cuando se produjo la ruptura del cilindro [21].

### **5.9.3. Ensayo de resistencia a la flexión.**

Para realizar este ensayo, se utilizó la máquina para ensayos de flexión, primero se tomaron las viguetas de la piscina y se secaron superficialmente, luego se llevó a la máquina donde se realizó el ensayo a la flexión. En ésta máquina se colocó la vigueta de tal manera que la fuerza quedó repartida uniformemente (ver Anexo B). A continuación, se procedió a operar la máquina y se aplicó la fuerza necesaria para producir la ruptura de la vigueta, en este momento se tomó la lectura correspondiente [23].

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1. ENSAYOS SOBRE EL CEMENTO MARCA ARGOS, TIPO I

#### 6.1.1. Ensayo de finura del cemento

Los resultados finales obtenidos en el ensayo de finura sobre el cemento se muestran en la Tabla 12. Los cálculos se muestran en el Anexo D.

**Tabla 12.** Valores obtenidos de la finura de cemento

Prueba	Muestra (g)	Residuos (g)	Finura (%)
1	50	0.4	99.2
2	50	0.4	99.2
3	50	0.3	99.4
<b>Finura promedio del cemento (%)</b>			99.26

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013

El valor obtenido de la finura promedio del cemento, luego de realizar tres pruebas y haber pasado las muestras por el tamiz No. 200, fue de 99.26%, es decir, mayor al valor de 95% establecido por la norma NTC-121[44], por lo tanto se concluye que el cemento utilizado es aceptado. Cabe resaltar que en el ensayo de finura el resultado no es 100% porque esto implicaría un caso ideal, situación que no se presenta en la realidad. La determinación de la finura del cemento, mediante el método utilizado, ayudó a establecer qué tan fino es el cemento, lo cual es un índice de la calidad de éste, debido a que un cemento más fino gana resistencias más rápidamente en comparación a cementos gruesos[45].

#### 6.1.2. Ensayo de peso específico del cemento

Los cálculos del peso específico se detallan en el Anexo D. En la Tabla 13 se muestran los resultados encontrados

**Tabla 13.** Valores obtenidos del ensayo de peso específico del cemento.

Volumen inicial (cm <sup>3</sup> )	1	Muestra de cemento (g)	64
Volumen final (cm <sup>3</sup> )	22	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	3,05
Volumen desplazado (cm <sup>3</sup> )	21		

**Fuente:** Elaborada en la presenta investigación. Mayo 18 del 2013

El valor obtenido para el peso específico (3.05 g/cm<sup>3</sup>), corresponde con los valores típicos para cementos con adiciones diferentes de yeso, los cuales están en un rango de 3.00 a 3.10 g/cm<sup>3</sup> [9]. Como se mencionó en el marco teórico, el peso específico de un cemento ideal es 3.15 (gr/cm<sup>3</sup>), sin embargo el rango de aceptación es 2.9 y 3.15 (gr/cm<sup>3</sup>) [38] y el resultado obtenido está un poco alejado del valor ideal pero se encuentra dentro del rango de admisión.

## **6.2. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE EL AGREGADO GRUESO (GRAVA TRITURADA)**

### **6.2.1. Ensayo de gravedad específica y absorción de agua.**

Los cálculos se detallan en el Anexo E y los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 14, donde se muestra el valor de la gravedad específica aparente igual a 2,66g/cm<sup>3</sup>, este valor es exactamente el mismo reportado en la literatura [19]; por su parte, el valor de la absorción de agua es igual a 3,07%, indica la cantidad de agua que puede absorber los poros saturables comparado con su condición seca, se ha encontrado que la cantidad de poros saturables debe ser mínima para controlar el contenido neto de agua en el concreto y así contribuir al control de calidad de este [46].

**Tabla 14.** Valores obtenidos del ensayo de gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso.

Gravedad específica bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	2.46
Gravedad específica bulk S.S.S*(gr/cm <sup>3</sup> )	2.53
Gravedad específica aparente(gr/cm <sup>3</sup> )	2,66
Absorción de agua (%)	3,07

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación, Mayo 18 del 2013. \*SSS: saturada superficialmente seca.

### 6.2.2. Ensayo de granulometría del agregado grueso.

Después de realizar el ensayo se obtuvieron los siguientes datos:

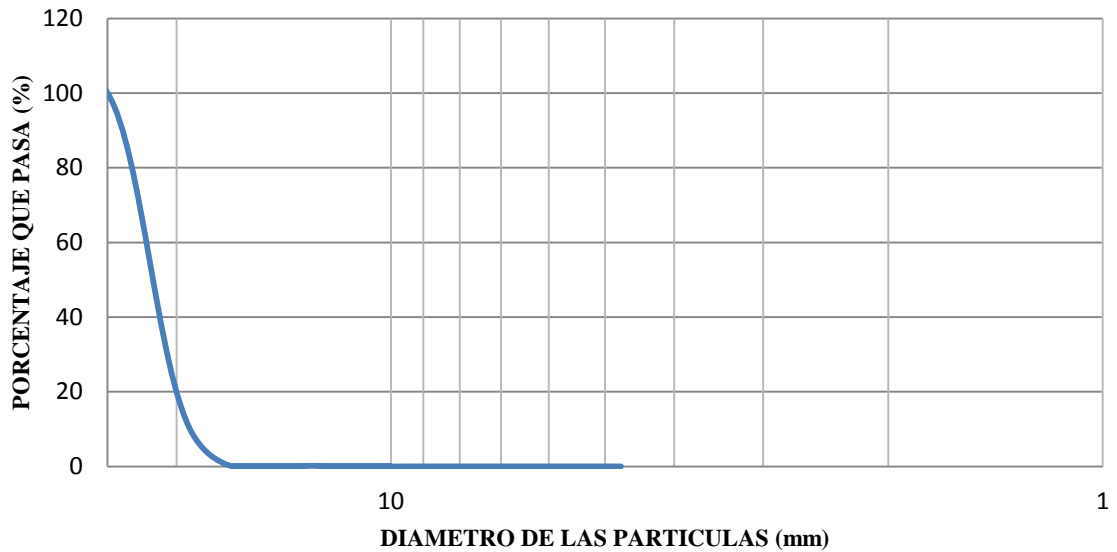
**Tabla 15.** Valores obtenidos del ensayo de granulometría del agregado grueso.

Nº de Tamiz	Diámetro (mm)	Masa de solido retenido (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado retenido	Porcentaje que pasa
1" 1/2	37,5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	921,5	91,2376	91,2376	8,7624
1/2"	12,5	88,5	8,7624	100	0
<b>Total</b>		1010	100%		

**Fuente:** Elaborada en la presenta investigación. Mayo 18 del 2013

La Figura 2 representa los valores mostrados en la Tabla 15 donde se observa un tamaño uniforme en el agregado grueso, el cual se encuentra entre ½ a ¾ de pulgada, es decir, de 12.5 a 25 mm.

**Figura 2.** Grafica de la curva granulométrica del agregado grueso.



**Fuente:** Programa Excel. Mayo 18 del 2013.

Además, se deduce que la muestra contiene una mayor cantidad de agregados con tamaño de partículas entre 25mm y 19mm debido a que el porcentaje que pasa a través de este último es tan solo de 8%. Mientras que el retenido es aproximadamente de 92% de la muestra representativa. Comparando con los valores encontrados en la literatura se obtienen valores similares pero ligeramente inferiores a los establecidos por la Norma NTC 174 [47]. Además, según investigaciones se recomienda utilizar grava triturada con un tamaño máximo de ¾” (20mm) porque entre menor sea el tamaño del agregado grueso aumenta la trabajabilidad del concreto [46].

### 6.3. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE EL AGREGADO FINO Y RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.

#### 6.3.1. Ensayo de densidad y absorción de agua

Los resultados obtenidos al realizar las pruebas se muestran a continuación, ver Anexo F:

**Tabla 16.** Valores obtenidos del ensayo de densidad y absorción de agua del agregado fino y del residuo de granalla de silicato de aluminio.

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Gravedad específica bulk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gravedad específico bulk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gravedad específico aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción de agua (%)</b>
Agregado fino	2,46	2,53	2,64	2,67
Residuo	2,60	2,63	2,78	1,05

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013

En la Tabla 16 se observa la gravedad específica del residuo y de la arena, estos valores son muy parecidos, con un porcentaje de error de 1%, según lo reportado en la literatura estos valores se encuentran en el rango de aceptación que es entre 2.4 y 2.9 (g/cm<sup>3</sup>) [48]. Por el contrario la absorción de agua arrojó valores muy diferentes, disminuyendo a un 62,2% comparado con el de la arena; por lo tanto, se concluye que este comportamiento se debe a que el residuo contiene material orgánico, el cual no es soluble en agua y no absorbe mucha cantidad de esta.



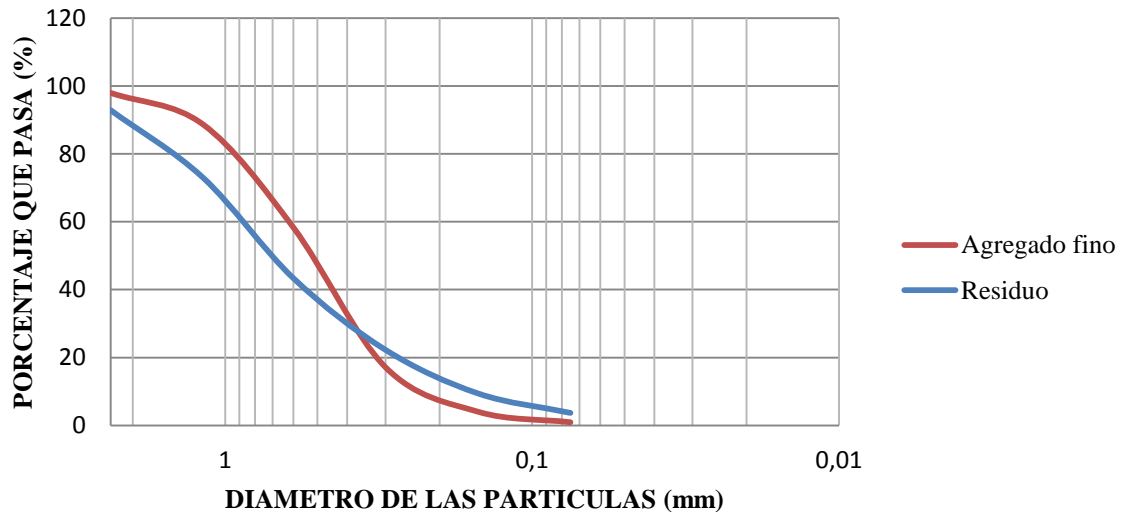
### 6.3.2. Ensayo de granulometría de agregado fino y residuo

**Tabla 17.** Valores obtenidos del ensayo de granulometría del agregado fino y del residuo.

N° de Tamiz	Diámetro (mm)	Masa de solido retenido (g)		Porcentaje retenido (%)		Porcentaje acumulado retenido		Porcentaje que pasa		Diámetro medio aritmético	
		Arena	Residuo	Arena	Residuo	Arena	Residuo	Arena	Residuo	Arena	Residuo
8	2,36	10,3	35,4	2,06	7,16	2,06	7,16	97,94	92,84	3,53	3,53
16	1,18	46,4	98,3	9,29	19,87	11,35	27,03	88,65	72,97	1,77	1,77
30	0,6	151,2	146,2	30,28	29,56	41,63	56,59	58,37	43,41	0,89	0,89
50	0,3	206,1	104,7	41,27	21,17	82,90	77,76	17,10	22,24	0,45	0,45
100	0,15	65,2	63,4	13,05	12,82	95,95	90,58	4,05	9,42	0,225	0,225
200	0,075	15,5	28,3	3,10	5,72	99,05	96,30	0,95	3,70	0,1125	0,1125
FONDO		4,7	18,3	0,95	3,70	100	100				
<b>TOTAL</b>		499,4	494,6	100%	100%	Módulo de finura del Residuo= 2,59 Módulo de finura del Arena = 2,34 Diámetro Medio de la Arena = 0,46 mm Diámetro Medio del Residuo= 0,5 mm					

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013

**Figura 3.** Grafica de las dos curvas granulométricas del agregado fino y del residuo.



**Fuente:** Programa de Excel. Mayo 18 del 2013

Los anteriores valores, presentados en la Tabla 17, se representan en la Figura 3, donde se observan las curvas granulométricas del agregado fino y del residuo; para el agregado fino el 60% de la muestra está entre el rango de 0.08 – 0.6 mm, mientras que para el residuo el 60% de la muestra tiene un tamaño que oscila entre 0.08 a 0.9 mm, además se observa que en el residuo hay mayor cantidad de partículas de un tamaño menor a 0,3 mm en comparación al agregado fino, sin embargo, el porcentaje de partículas con menor tamaño a 0.06 mm es mayor en la arena que en el residuo, es decir que el residuo tiene mayor cantidad de partículas con tamaño mayor a 0,06 mm comparado con la arena, esto se observa muy claramente en el módulo de finura, lo cual indica que tan grueso o fino es una muestra, el módulo de finura para la arena es 2,34 mientras que para el residuo es 2,59; según investigaciones realizadas [46], estos valores se encuentran dentro del rango de aceptación que va de 2 a 3,2, donde el valor de 2 a 2,5 indica una arena fina, el rango de 2,5 a 2,7 indica una arena mediana mientras que 2,7 a 3,2 señala una arena gruesa, además las investigaciones indican que entre mayor sea el módulo de finura es más satisfactorio producir una buena trabajabilidad y elevada resistencia mecánica, de ser así, se esperaría que las probetas de concreto con agregado de residuo presenten mayor resistencia [46].

#### 6.4. DISEÑO DE MEZCLA

En la Tabla 18 se muestran los resultados del diseño de mezcla de las muestras a las diferentes dosificaciones establecidas, teniendo en cuenta que se preparó 0,01 m<sup>3</sup> de concreto para las muestras, en el Anexo G se detallan los cálculos.

**Tabla 18.** Valores obtenidos del diseño experimental.

<b>Sustitución en porcentaje (%)</b>	<b>Cantidad de cemento (Kg)</b>	<b>Cantidad de grava (Kg)</b>	<b>Cantidad de agua (Kg)</b>	<b>Cantidad de arena (Kg)</b>	<b>Cantidad de residuo (Kg)</b>
<b>0</b>	5	15	2,5	10	0
<b>10</b>	5	15	2,5	9	1
<b>30</b>	5	15	2,5	7	3
<b>50</b>	5	15	2,5	5	5

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

Los valores mostrados en la Tabla 18 fueron obtenidos a partir del diseño de mezcla realizado, estas fueron las cantidades de materias primas utilizadas para la elaboración de las probetas y viguetas.

#### 6.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Los valores de la resistencia a la compresión obtenidos mediante la realización de los ensayos descritos son presentados en la Tabla 19:

**Tabla 19.** Valores promedios obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 7, 14 y 28 días.

<b>Periodo de curado (días)</b>	<b>Sustitución en porcentaje (%)</b>	<b>Resistencia promedio- media (PSI)</b>
<b>7</b>	0	1500
	10	1339
	30	1648
	50	604
<b>14</b>	0	2333,25
	10	2026,50
	30	2128,34
	50	1004,69
<b>28</b>	0	2762,37
	10	2311,075
	30	2742,655
	50	1770,265

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

Un análisis de varianza (ANOVA) se aplicó, utilizando el programa STATGRAPHICS CENTURION, con el fin de determinar si la media de los valores obtenidos, en los ensayos de resistencia a la compresión con un periodo de curado de 7, 14 y 28 días, afectan la respuesta (resistencia a la compresión) de acuerdo a los diferentes niveles del factor de sustitución en porcentaje.

**Tabla 20.** ANOVA para la resistencia a la compresión de 7, 14 y 28 días.

Periodo de curado (días)	Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los Cuadrado	Razón-F	Valor-P
7	Entre grupos	1,28814E6	3	429381,	25,0214	0,0047
	Intra grupos	68642,0	4	17160,5		
	<b>Total</b>	1,35678E6	7			
14	Entre grupos	968626	3	322875	4,12188	0,1024
	Intra grupos	313329	4	78332,2		
	<b>Total</b>	1,28195E6	7			
28	Entre grupos	1,3063E6	3	435435	15,52	0,0114
	Intra grupos	112249	4	28062,3		
	<b>Total</b>	1,41855E6	7			

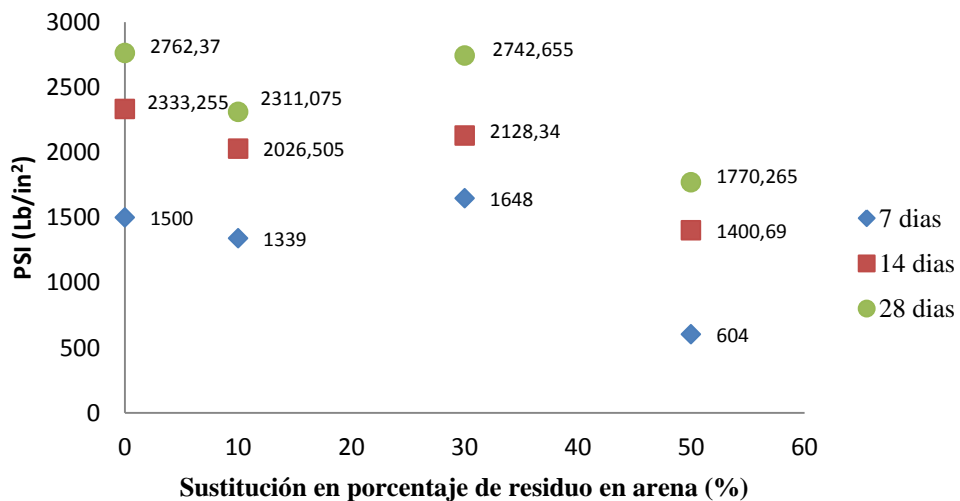
**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

La Tabla 22 de ANOVA descompone la varianza de resistencia a la compresión en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, para el caso de 7 días es igual a 25,0214, mientras que para el periodo de 14 y 28 días los valores son 4,12188 y 15,52 respectivamente, teniendo en cuenta que el valor de F es el cociente entre la media de los cuadrados entre grupos y la media de los cuadrados dentro de grupos. Ahora, con respecto al valor de P, en un periodo de 7 días es igual a 0,0047, por otro lado, en un periodo de 14 y 28 días es 0,1024 y 0,0114 respectivamente; como se observa los valores de P para 7 y 28 días son menores que 0,05, por lo cual se concluye que para estos dos casos, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la resistencia a la compresión de un nivel de sustitución del residuo de arena y otro, con un nivel del 95% de confianza. Por el contrario, en el periodo de 14 días no existe ninguna diferencia significativa porque el valor de P es mayor a 0,05.

Ahora, para poder determinar cuáles valores promedios (medias) son significativamente diferentes de otros, se realiza en STATGRAPHICS CENTURION una prueba de Múltiples Rangos (ver Anexo H) utilizando el método de Diferencias Mínimas Significativas con 95%

de confiabilidad y se obtuvo como resultado que para el periodo de 7 días las diferencias significativa se presentan entre los pares formados con el 50% de sustitución de residuo en arena , es decir, los pares de 0%-50%, 10%-50% y 30%-50%. En el periodo de 14, a pesar que en la Tabla 22, se mostró que no existían diferencias significativas, la prueba de múltiples rangos arrojó que los valores obtenidos son semejantes entre los porcentajes de sustitución excepto cuando se compara el par de 0% y 50%. Por último, para un periodo de curado de 28 días, las muestras de 50% de sustitucion arrojan resultados muy alejados comparados con los demas, por lo tanto se presentan diferencias estadisticamente significativas. Para analizar como fue el comportamiento de las muestras en los diferentes periodos de curado, se representan los valores promedios de la resistencia a la compresión en una gráfica, los cuales son exhibidos en la Figura 23.

**Figura 4.** Valores de la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días.



**Fuente:** Programa de Excel. Mayo 19 del 2013.

En la Figura 4 se observa que para un periodo de 7 días, la mayor resistencia corresponde al 30% de contenido de residuo de granalla de silicato de aluminio aunque las diferencias, encontradas en el análisis de varianza, con la muestra patrón (0% de contenido de residuo) no son significativas, es decir que los resultados de resistencia a la compresión son similares entre estas dos composiciones. También se observa que para un periodo de 14 y 28 días de

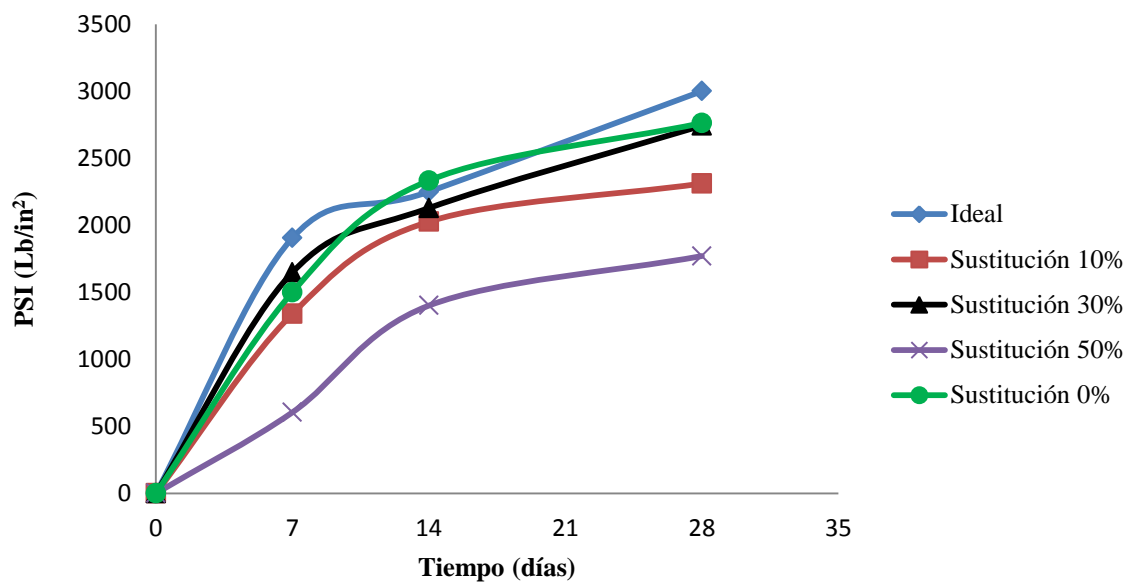
curado, la mayor resistencia se presenta en la muestra patrón. La grafica muestra que en todos los periodos de curado, la menor resistencia corresponde a las muestras de 50% de sustitución, mostrando valores muy por debajo de la muestra patrón.

Para un periodo de 7 días, la muestra al 10% de sustitución disminuyó la resistencia a la compresión un 10,78% con respecto a la muestra patrón, mientras que la muestra al 30% aumentó 9,86%, sin embargo la muestra al 50% disminuyó considerablemente un 59,73%, es decir la resistencia a la compresión se redujo más de la mitad con respecto a la muestra patrón. Para un periodo de 14 días, las muestras de 10%, 30% y 50% disminuyeron un 13,14%, 8,78% y 39,9%, respectivamente. Por último para el periodo de curado de 28 días, las muestras de 10%, 30% y 50% disminuyeron un 16,33%, 0,71% y 35,91%, respectivamente. Se deduce que las muestras al 50% no son aptas para aplicaciones en la construcción, mientras que las muestras al 10% y 30% presentan valores muy similares a la muestra patrón, esto indica que estas muestras pueden ser utilizadas en aplicaciones en la construcción.

Según Quiñones M. y Causil H. de la Universidad de Cartagena, al adicionar partículas de microfílice en concreto, se observa una tendencia de aumento de la resistencia a la compresión, a medida que se aumenta el contenido de microfílice, presentando una mayor resistencia al 9% [16]. De los ensayos realizados, se deduce que el residuo a pesar de tener un módulo de finura mayor que la arena no confiere una mejor resistencia a la compresión en los porcentajes de 10% y 30%, aunque los resultados no difieren de manera considerable con la composición de 0%. Por el contrario, para la sustitución al 50% se observó un valor inferior en la resistencia a la compresión debido a que al aumento de la cantidad de materia orgánica presente en el residuo. Para verificar lo anterior, se realizó la determinación de materia orgánica según la norma ASTM C40 [49], (ver Anexo I), en la que se comprobó cualitativamente mediante una prueba colorimétrica la cantidad de compuestos orgánicos, el color más oscuro se relaciona con la muestra al 50%, la cual debe presentar una mayor cantidad de materia orgánica, lo que afecta directamente la absorción de agua y la resistencia mecánica. Este material orgánico que proviene del crudo, forma una barrera aceitosa en las partículas del residuo y en la probeta de concreto lo que hace que no absorba [48].

De acuerdo a la Tabla 5, referenciada en el marco teórico, en la cual se muestra el aumento de la resistencia a la compresión (comportamiento ideal) del concreto con el transcurso del tiempo, de los distintos tipos de cemento en Colombia, entre ellos el cemento Argos tipo I [9], al graficar estos valores y comparar con los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión, obtenemos la siguiente gráfica:

**Figura 5.** Grafica de los valores de la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días y el comportamiento ideal del cemento Argos tipo I.



**Fuente:** Programa de Excel. Mayo 20 del 2013

De la gráfica anterior, se observa que todas las muestras se encuentran por debajo del comportamiento mecánico ideal, aunque la más alejada es la de 50% de sustitución. Se puede inferir que no se alcanza un comportamiento de idealidad porque estas mezclas ideales son preparadas con un control de calidad muy estricto y se utiliza maquinaria (mezcladora de concreto) donde se mezcla la materia prima del concreto que por obvias razones queda mucho más homogénea y compacta. Para este caso, en las mezclas no se tuvo un control de calidad estricto y fueron preparadas artesanalmente sin ningún tipo de dispositivo mecánico. Sin embargo, aunque la muestra patrón, la de 10% y 30%, se encuentre por debajo de la idealidad,



no se alejan mucho del comportamiento de esta y esto indica que la mezcla fue preparada correctamente.

## 6.6. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

Los valores de la resistencia a la tracción obtenidos mediante la realización de los ensayos descritos se presentan en la Tabla 23:

**Tabla 21.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 7, 14 y 28 días.

Periodo de curado (días)	Sustitución en porcentaje (%)	Resistencia promedio- media (PSI)
7	0	190,02
	10	188,13
	30	232,95
	50	153,74
14	0	220,03
	10	228,58
	30	242,39
	50	183,26
28	0	227,08
	10	245,03
	30	256,82
	50	200,41

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

El análisis de varianza (ANOVA) es presentado en la Tabla 23. La hipótesis nula, donde se considera que las composiciones del residuo de granalla de silicato de aluminio no afecta la resistencia a la tracción en un periodo de curado de 7, 14 y 28 días, es estudiada.

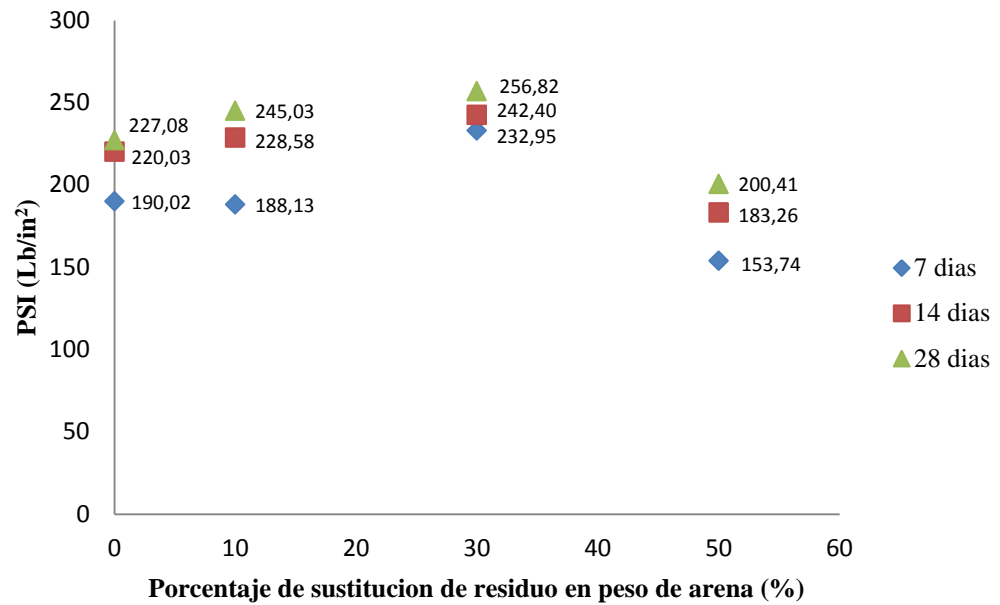
**Tabla 22.** ANOVA para la resistencia a la Tracción Indirecta de 7, 14 y 28 días.

Periodo de curado (días)	Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los Cuadrado	Razón-F	Valor-P
7	Entre grupos	6314,35	3	2104,78	3,43	0,1326
	Intra grupos	2457,89	4	614,472		
	<b>Total</b>	8772,23	7			
14	Entre grupos	3630,27	3	1210,09	0,55	0,6768
	Intra grupos	8867,22	4	2216,8		
	<b>Total</b>	12497,5	7			
28	Entre grupos	3324,67	3	1108,22	4,27	0,0973
	Intra grupos	1037,61	4	259,403		
	<b>Total</b>	4362,28	7			

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

La Tabla 24 se descompone la varianza de resistencia a la tracción en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, para el caso de 7 días es igual a 3,43, mientras que para el periodo de 14 y 28 días los valores son 0,55 y 4,27 respectivamente, teniendo en cuenta que el valor de F es el cociente entre la media de los cuadrados entre grupos y la media de los cuadrados dentro de grupos. Ahora, con respecto al valor de P, en un periodo de 7 días es igual a 0,1326, por otro lado, en un periodo de 14 y 28 días es 0,6768 y 0,0973 respectivamente; como se observa los valores de P para todos los periodos son mayores que 0,05, por lo cual se concluye que para estos casos, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la resistencia a la tracción de un nivel de sustitución del residuo de arena y otro, con un nivel del 95% de confianza y la hipótesis nula se confirma. Sin embargo, mediante el método de múltiples rangos del programa STATGRAPHICS CENTURION, se determinó los pares en los que existía una diferencia significativa, encontrando que para el periodo de 7 y 28 días se presentó una diferencia significativa en los pares formados de 30% y 50% de sustitución (ver Anexo H).

**Figura 6.** Grafica de los valores de la resistencia a la tracción a 7, 14 y 28 días.



**Fuente:** Programa de Excel. Mayo 20 de mayo

En la Figura 6 se observa que para todos los periodos de curado, la mayor resistencia corresponde al 30% de contenido de residuo de granalla de silicato de aluminio, también se observa que incluso la muestra al 10% presenta una mayor resistencia comparándola con la muestra patrón, excepto para un periodo de curado de 7 días. La grafica muestra que en todos los periodos de curado, la menor resistencia corresponde a las muestras de 50% de sustitución, mostrando valores muy por debajo de la muestra patrón.

Para un periodo de 7 días, la muestra al 10% de sustitución disminuyo la resistencia a la tracción un 0,99% con respecto a la muestra patrón, mientras que la muestra al 30% aumento 22,6%, sin embargo la muestra al 50% disminuyo considerablemente un 19,09%. Para un periodo de 14 días, las muestras de 10% y 30% aumentaron 3,88% y 10,16%, respectivamente, con respecto a la muestra patrón, sin embargo para la muestra de 50% la resistencia a la tracción disminuyo 16,71%. Por último, para el periodo de curado de 28 días, las muestras de 10% y 30% aumentaron la resistencia a la tracción, 7,9% y 13,09% respectivamente, con respecto a la muestra patrón, mientras que la muestra al 50% disminuyo 11,74%.

Al comparar los valores obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión con los valores de la resistencia a la tracción, se encontró que se cumple la teoría, en donde la resistencia a la tracción es del 8% y 12% de la resistencia a la compresión [9]; además se observó que en los valores obtenidos en la resistencia a la tracción indirecta, no influye la duración del periodo de curado 7, 14 y 28 días, porque fueron similares entre sí.

Según se ha reportado en investigaciones, al adicionar fibras de estopa de coco para mejorar las propiedades del concreto, la resistencia a la tracción indirecta disminuye al aumentar la cantidad de adición de la fibra de coco, al igual que las fibras de menor longitud, presentando una mayor resistencia cuando se le incorpora fibras de coco de longitud 5cm con un volumen de 0,5%, en comparación a la muestra patrón [50]. Un caso similar se presenta en esta investigación, el comportamiento de la resistencia a tracción indirecta difiere de la resistencia a la compresión, aunque en ambos casos, la que presentó la menor resistencia es a la composición de sustitución del 50%, se infiere nuevamente, que los resultados en el comportamiento mecánico se afectan por la cantidad de materia orgánica y la cantidad de finos que contiene el residuo. Este material orgánico que proviene del crudo, forma una barrera aceitosa entre las partículas del residuo y los otros agregados del concreto lo que hace que disminuya la absorción de agua en el concreto que sumado con el alto porcentaje de finos en el residuo contribuye a una menor porosidad y ofrece buenas propiedades mecánicas, similares, y en algunos casos mejores, a la muestra patrón de concreto. Como la absorción de agua es relevante en la durabilidad del concreto y su limitación puede mejorar la respuesta del concreto a efectos como la corrosión, el ataque de sulfatos o el ingreso de cloruros [51], la presencia de los orgánicos en el residuo de granalla puede favorecer el desempeño del concreto, pero es necesario realizar otros ensayos para comprobar estas suposiciones. Sin embargo cuando el porcentaje de residuo aumentó al 50%, esta característica afecta el proceso de curado debido a la repulsión existente entre las moléculas del agua y los compuestos orgánicos presentes en el material. Los poros y los vacíos dentro del concreto tienen una gran influencia a escala macroscópica en los módulos elásticos, esfuerzos y otras propiedades mecánicas del concreto. Una menor porosidad, debido a la presencia de un mayor contenido de finos en el residuo aumenta el esfuerzo a la tensión como al corte [52].

## 6.7. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Los valores de la resistencia a la flexión obtenidos mediante la realización de los ensayos descritos son presentados en la Tabla 26 para un periodo de 28 días de curado del concreto, se tiene que las composiciones de residuo de granalla de silicato de aluminio no afectan los resultados en la resistencia a la flexión, de acuerdo a un ANOVA aplicado a los datos experimentales

**Tabla 23.** Valores promedios obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión para 28 días.

Periodo de curado (días)	Sustitución en porcentaje (%)	Promedio
28	0	373,5
	10	348,6
	30	373,5
	50	298,8

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla 24.** ANOVA para la resistencia a la flexión de 28 días.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de los Cuadrado	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7440,12	3	2480,04	2,77	0,1751
Intra grupos	3582,28	4	895,57		
<b>Total</b>	11022,4	7			

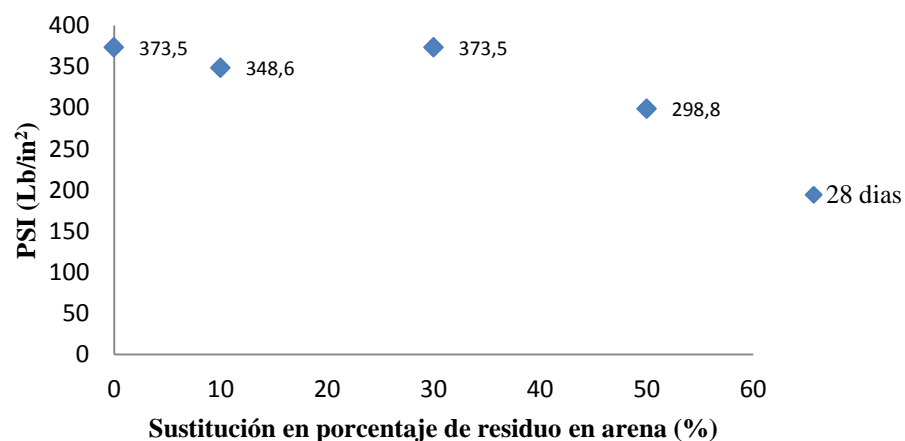
**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

La Tabla 27, el valor de la razón-F, es igual a 2,77, mientras que el valor-P es igual a 0.1751, lo que es mayor que 0.05, por lo tanto se concluye que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la resistencia a la flexión de un nivel de

sustitución del residuo de arena y otro. Sin embargo se realizó una prueba de múltiples rango en la que se obtuvo que no existen diferencias significativas en ninguno de los pares formados, es decir, los valores que se obtuvieron en este ensayo fueron similares en cada porcentaje de sustitución.

Para analizar como fue el comportamiento de las muestras en los diferentes periodos de curado, se introducen los valores promedios de la resistencia a la flexión representados en la Figura 7y se obtiene la siguiente gráfica,

**Figura 7.** Grafica de los valores de la resistencia a la flexión a 28 días.



**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013

En la Figura 7 se observa que para el periodo de curado de 28 días, la mayor resistencia corresponde al 30% y 0% de contenido de residuo de granalla de silicato de aluminio, teniendo un valor promedio igual en estas dos muestras. Además, la gráfica muestra nuevamente, la menor resistencia corresponde a las muestras de 50% de sustitución, mostrando valores muy por debajo de la muestra patrón y la muestra del 30%.

La muestra al 10% de sustitución disminuyó la resistencia a la flexión 6,67%, mientras que la muestra al 30% tuvo un error de 0%, sin embargo la muestra al 50% disminuyó considerablemente 20%, todos estos valores con respecto a la muestra patrón. Los resultados

obtenidos en este ensayo superan los establecidos en la literatura donde la resistencia a la flexión está de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión

Se ha reportado en estudios relacionados con el tema, que al adicionar fibras cocos para mejorar las propiedades del concreto, la resistencia a la flexión presenta un comportamiento similar a la resistencia la tracción, presentando una mayor resistencia a la flexión cuando se adiciona fibras de coco de longitud 5cm con un volumen de 0,5%, en comparación a la muestra patrón debido a que la carga se distribuye alrededor de la fibra [50]. Como se había mencionado, en este caso los valores promedios son iguales para las muestra patrón y 30%.

### 6.8. ANALISIS DE BENEFICIOECONÓMICO DEL USO DE RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.

**Tabla 25.** Costos de mezcla general de  $1\text{m}^3$  de concreto para una resistencia de 3000 PSI.

Dosificación 1:2:3 – A/C=0,45 – Para $1\text{m}^3$ de concreto.				
Materiales y herramientas	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)/Kg	Valor parcial (\$)
Cemento	Kg	350	405	141,750
Arena	Kg	835	15	12,525
Triturado	Kg	1,678	32	53,696
Agua	L	180	20	3,600
Mezcladora	Día	1	70,000	70,000
Mano de obra	$\text{m}^3$	1	80,000	80,000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>361,571</b>

**Fuente:** Proporcionado por la empresa Barrios Padilla Ingenieros S.A.S.

De Tabla 28 se observa los costos requeridos para obtener  $1\text{m}^3$  de concreto a 3000 PSI, el costo total de concreto para un diseño de mezcla general, es de \$ 361,571 pesos colombianos. Se toman los valores unitarios correspondientes a la materia prima del concreto y para el diseño de mezcla resultante de los cálculos se obtiene los siguientes valores:

**Tabla 26.**Costos del diseño de mezcla de  $1\text{m}^3$  de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 0% de sustitución de residuo.

A/C=0,45 – Para $1\text{m}^3$ de concreto.				
<b>Materiales y herramientas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)/Kg</b>	<b>Valor parcial (\$)</b>
Cemento	Kg	360	405	145,800
Arena	Kg	727.32	15	10,909.8
Triturado	Kg	1090.9	32	34,908.8
Residuo	Kg	0	0*	0
Agua	L	180	20	3,600
Mezcladora	Día	1	70,000	70,000
Mano de obra	$\text{m}^3$	1	80,000	80,000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>345,218.6</b>

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 20 del 2013.

\*en este caso el residuo tiene un valor de 0 \$/Kg debido a que en este momento se considera un desecho de la empresa

**Tabla 27.**Costos del diseño de mezcla de  $1\text{m}^3$  de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 10% de sustitución de residuo.

A/C=0,45 – Para $1\text{m}^3$ de concreto.				
<b>Materiales y herramientas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)/Kg</b>	<b>Valor parcial (\$)</b>
Cemento	Kg	360	405	145,800
Arena	Kg	654.86	15	9,822.9
Triturado	Kg	1091.48	32	34,927.36
Residuo	Kg	72.76	0	0
Agua	L	180	20	3,600
Mezcladora	Día	1	70,000	70,000
Mano de obra	$\text{m}^3$	1	80,000	80,000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>344,150.26</b>

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 20 del 2013.



\*en este caso el residuo tiene un valor de 0 \$/Kg debido a que en este momento se considera un desecho de la empresa.

**Tabla 28.** Costos del diseño de mezcla de  $1\text{m}^3$  de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 30% de sustitución de residuo.

A/C=0,45 – Para $1\text{m}^3$ de concreto.				
<b>Materiales y herramientas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)/Kg</b>	<b>Valor parcial (\$)</b>
Cemento	Kg	360	405	145,800
Arena	Kg	509.76	15	7,646.4
Triturado	Kg	1092.33	32	34,954.56
Residuo	Kg	218.47	0	0
Agua	L	180	20	3,600
Mezcladora	Día	1	70,000	70,000
Mano de obra	$\text{m}^3$	1	80,000	80,000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>342,000.96</b>

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 20 del 2013.

\*en este caso el residuo tiene un valor de 0 \$/Kg debido a que en este momento se considera un desecho de la empresa.

**Tabla 29.** Costos del diseño de mezcla de  $1\text{m}^3$  de concreto para una resistencia de 3000 PSI con 50% de sustitución de residuo.

A/C=0,45 – Para $1\text{m}^3$ de concreto.				
<b>Materiales y herramientas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (\$)/Kg</b>	<b>Valor parcial (\$)</b>
Cemento	Kg	360	405	145800
Arena	Kg	364,42	15	5466,3
Triturado	Kg	1093,26	32	34984,32
Residuo	Kg	364,42	0	0
Agua	L	180	20	3,600
Mezcladora	Día	1	70,000	70,000

Mano de obra	m <sup>3</sup>	1	80,000	80,000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>339,850.62</b>

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 20 del 2013.

\*en este caso el residuo tiene un valor de 0 \$/Kg debido a que en este momento se considera un desecho de la empresa.

En las Tablas 29 a 32, se muestran los costos de producción de concreto a las diferentes sustituciones del residuo de granalla de silicato de aluminio, como se nota al residuo no se le asigna ningún valor agregado pues este es un material de desecho que no tiene ningún valor comercial, comparando los costos totales se observa que el menor costo para una mezcla de 3000 psi con 50% de sustitución de residuo con un valor de \$ 339,850.62 con respecto a la muestra patrón de \$345,218.6 pero como se concluyó, en los ensayos de compresión, tracción y flexión aplicados, este porcentaje no cumple con los requisitos esperados, también se puede notar que el costo de operación para resistencia de 3000 psi con el 30% de sustitución de residuo es menor que el costo de producción de la muestra patrón y además las pruebas de compresión, tracción y flexión dieron resultados favorables para el diseño de mezcla de concreto. Se concluye que para fines económicos y técnicos se recomienda un mezcla al 30% de sustitución de residuo; para preparar un metro cubico de concreto al 30% de sustitución de residuo por arena, se gastan 364,42 kg, es decir, que se consumen 0,36442 toneladas de las dos toneladas que están acumuladas en la empresa. Se concluye que al utilizar el residuo de silicato de aluminio en concreto se ha encontrado un aprovechamiento a este residuo, disminuyendo la acumulación de este y por tanto el impacto ambiental que este genera. Una aplicación adecuada para el concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio es en la construcción de andenes, pisos y placas de contrapiso.

## CONCLUSIONES

Para los ensayos de caracterización fisicoquímica como granulometría, gravedad específica y absorción de agua, se observó que la materia prima e incluso el residuo, presentaron valores dentro del rango de aceptación propuesta en la literatura, cumpliendo con los requisitos establecidos para el desarrollo de un concreto de buena resistencia mecánica y calidad.

En los ensayos de resistencia a la compresión, la muestra patrón obtuvo la mayor resistencia excepto en el periodo de curado de 7 días. La muestra al 30% obtuvo un mejor comportamiento dentro de las muestras modificadas con residuo de granalla de silicato de aluminio.

En los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, se concluye que todos los resultados obtenidos se encuentran entre el 8% y el 12% de la resistencia a la compresión, como lo establece la literatura; además la sustitución del residuo favoreció la resistencia a la tracción porque la muestra al 30% arrojó resultados mayores comparados con la muestra patrón en todos los periodos de curado. También se observó que los valores obtenidos en los periodos de curado 7, 14 y 28 días, fueron similares entre sí, por lo tanto la influencia del periodo de curado en la resistencia a la tracción indirecta es mínima comparada con la resistencia a la compresión.

La sustitución de residuo de granalla de silicato de aluminio por arena, afectó positivamente la resistencia a la flexión debido a que su mayor valor se presentó en el concreto con 30% de sustitución de residuo, además los valores obtenidos en este ensayo fueron mayores a lo establecido en la literatura, en la que se indica que la resistencia a la flexión debe ser de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

Para las muestras al 50% de residuo de granalla de silicato de aluminio no se obtienen concretos con resistencias favorables ( $\leq 3000$  psi) por tanto para obras de ingeniería de elevado nivel de importancia como puentes, acueductos, embalses y pavimentos, no se

recomienda el empleo de estas mezclas por que no se garantizan los requerimientos de resistencia mecánica y la durabilidad del concreto.

De acuerdo al efecto de la adición de residuo de granalla de silicato de aluminio sobre las propiedades mecánicas del concreto, una aplicación adecuada de este tipo de compuesto (concreto –residuo de granalla de silicato de aluminio) es en la construcción principalmente de andenes, pisos y placas de contrapiso.

Por último se concluye que la utilización del residuo de granalla de silicato de aluminio en concreto conduce a beneficios económicos cuando se requiera producir grandes cantidades de concreto, además acarrea beneficios ambientales porque se mitiga la acumulación de este residuo empleándolo en mezclas de concreto.

## RECOMENDACIONES

- Para garantizar una buena calidad del concreto, se recomienda utilizar una máquina de mezclado para que este sea homogéneo y tenga una buena compactación, ya que estos factores influyen directamente en la trabajabilidad y durabilidad del concreto.
- Para futuras investigaciones se propone buscar el punto óptimo de la mezcla alrededor del 30% de sustitución del residuo de granalla de silicato de aluminio, para la cual se obtenga una resistencia mecánica máxima, ya que este porcentaje de sustitución fue el que mejor se comportó en los ensayos de compresión, tracción y flexión, en comparación a los de 10% y 50%.
- Debido a la finura del material, se recomienda el uso de equipos de seguridad para el personal que utilice este residuo, tales como mascara industrial anti polvo y guantes industriales.
- Se recomienda proponer un estudio de calcinación al residuo para eliminar impurezas orgánicas y así observar el comportamiento mecánico de las muestras.
- Se recomienda realizar un estudio con diferentes proporciones utilizadas en estas investigaciones para así comparar los resultados, además realizar la simulación de una proyección de la investigación a las condiciones de la ciudad de Cartagena.
- Se propone realizar un estudio de lixiviación de las probetas que contiene el concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio, para verificar que las trazas de metales pesados e hidrocarburos fueron aislados y aglomerados por el cemento.

## REFERENCIAS

- [1] M.H. Zhang and V.M. Malhotra. July 21, 1995, “*characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its used in concrete*” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25.No. 8.
- [2] Aguirre I. (2008). Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón. Tesis.
- [3] Abrasivos y Maquinaria, S.A, silicato de aluminio (arena para chorrear) [En línea]. Disponible en la web <http://www.abrasivosymaquinaria.com/silicato-de-aluminio>[Citado 23 julio del 2012].
- [4] Curso: Corrosión, prevención y protección. Análisis de casos [En línea]. Disponible en la web <http://www.unitecnologica.edu.co/programas-acad%C3%A9micos/educaci%C3%B3n-permanente/curso-corrosion-prevencion-y-proteccion-analisis-de-casos> [Citado 23 julio del 2012].
- [5] Masiol M, Hofer A, Squizzato S, Piazza R, Rampazzo G, Pavoni B *Carcinogenic and mutagenic risk associated to airborne particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons: A source apportionment* *Journal atmospheric Environment*.
- [6] Ramírez N. Concepto para la disposición del residuo de granalla de silicato de aluminio.
- [7] Cruz G. (2006). Solidificación de desechos industriales mediante cementación con cemento puzolanico. Universidad de las américas de puebla.
- [8] Ficha técnica del silicato de aluminio [En línea] disponible en la web [http://www.quiminet.com/archivos\\_empresa/a5df4fce81dac6f5f67e976e48ee9116.pdf](http://www.quiminet.com/archivos_empresa/a5df4fce81dac6f5f67e976e48ee9116.pdf) (citado el 31 de julio de 2012).
- [9] Diego Sanchez De Guzman. “*Ingeniero Civil, MIC, MScIS*”. Tecnología del Concreto y del Mortero. Quinta edición 2001. Editorial *BHANDAR EDITORES LTDA*.

- [10] Geogew T. Austin “*professoremeritus of Chemicalengineeringwashingtonstateuniversity*”. Manual de procesos químicos en la industria. Quinta edición en inglés (primera edición en español). Editorial *MC GRAW HILL*.
- [11] Producción de cemento Portland [En línea]. Disponible en la web [www.arquitecturamodelo.blogspot.com/search?q=cemento](http://www.arquitecturamodelo.blogspot.com/search?q=cemento) [Citado 21 febrero del 2013].
- [12] Finura del cemento [En línea]. Disponible en la web. <http://ingevil.blogspot.com>. [Citado 3 de marzo del 2013].
- [13] Norma Técnica Colombiana (NTC) 226. Método de ensayo para determinar la finura de cemento.
- [14] Peso específico del cemento. [En línea]. Disponible en la web. <http://institutedeensayoseingenieriaaca.blogspot.com/2010/06/peso-especifico-del-cemento.html>. [Citado 3 de marzo del 2013].
- [15] A. M. Neville y J.J. Brooks. Tecnología del concreto. Primera edición 1998. Editorial *Trillas, S.A. de C.V. (México, D.F.)*.
- [16] Quiñones, M y Causil, H (2012) Estudio comparativo de manejabilidad resistencia y costos de mezclas de concreto in situ adicionadas con microsíllice. Universidad de Cartagena.
- [17] Alvarez C. y Manjarres K. (2008) Influencia de las características del agua de mezclado en la resistencia del concreto de 3000 y 4000 PSI.
- [18] Norma ASTM C33. Especificación Normalizada para Agregados para Concreto.
- [19] Norma Técnica Colombiana (NTC) 176. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso.
- [20] Norma ASTM C39. Método estándar de prueba para la resistencia a la compresión de elementos cilíndricos de concreto.
- [21] Norma colombiana I.N.V. E – 411 – 07 Ensayo de tracción indirecta de cilindros normales de concreto.

- [22] Garrote E. (2009). Capítulo 2: el ensayo de tracción indirecta. Tesis.
- [23] Norma colombiana I.N.V. E – 415 – 07 Resistencia a la flexión del concreto Método de la viga simple cargada en el punto central.
- [24] P.S. Mangat, March 1976, “*Tensile strength of steel fiber reinforced concrete*”. Journal Cement and concrete Research, Volume 6, Issue 2, Pages 245-252.
- [25] Chunxiang Q, Patnaikuni I, “*Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending*”. Cement and Concrete Composites 21 (1999), pages 73-81.
- [26] W.W.J Chan, C.M.L Wu, June 2000, “*Durability of concrete with high cement replacement*”. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 6, Pages 865-879
- [27] G.R. Moore, D.E. Kline, P.D. Cady, R.E. Weyers, P.R. Blankenhorn, March 1983, “*Impregnation of concrete with hot epoxy resins*”. Journal Cement and concrete Research, Volume 13, Issue, Pages 721-727.
- [28] El-Hawary M, Al-Khaiat H, Fereig S. “*Performance of epoxy-repaired concrete in a marine environment*”. Cement and Concrete Research (2000), pages 259–266
- [29] P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu “*Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes*”. Cement and Concrete Research (2005), pages 1546–1550.
- [30] Tarja Häkkinen. 3 May 1993, “*The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete: technical properties and theoretical examinations*” Journal Cement and concrete Research, Volume 23, Pages 518-530.
- [31] Baoju Liu, Youjun Xie, Shiqiong Zhou, Qianlian Yuan “*Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete*”. Cement and Concrete Research (2000), pages 1489–1493.
- [32] Bekir , Canbaz M. “*Properties of concrete containing waste glass*”. Cement and Concrete Research 34 (2002), pages 267–274.



- [33] Rafat S. y GurpreetS. “*Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturin*”.Resources, Conservation and Recycling 55 (1998) 885– 89
- [34] M. Etxeberria , E. Vázquez, A. Marí, M. Barra. “*Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*” Cement and Concrete Research 37 (2007). Pages 735-742.
- [35] Serrano M. Perez D. Agregados no convencionales para la preparación de concretos ecológicos. Tesis.UniversidadPontificiabolivarianaseccional Bucaramanga.
- [36] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon, Shi-Cong Kou “*Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures*” . Cement & Concrete Composites (2010).Pages 265-272.
- [37] Md. Safiuddin, J.S. West, K.A. Soudki.“*Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash*”.Cement and Concrete Composites (2010).Pages 708-717.
- [38] Norma técnica colombiana (NTC) 221. Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico.
- [39] Norma técnica colombiana (NTC) 77. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.
- [40] Norma técnica colombiana (NTC) 237. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.
- [41] Norma ASTM E 11. “*Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*”.
- [42] Norma A.C.I (*American Concrete Institute*) 211.1-70. Diseño y calidad de las mezclas de concreto.
- [43] Norma ASTM C31. Elaboración y curación de las probetas cilíndricas y viguetas.

[44] Norma Técnica Colombiana (NTC) 121. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.

[45] Rivera G. Finura del cemento [En línea]. Disponible en la web. <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/gearnilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2006%20-%20Resistencia.pdf>. [Citado 25 de mayo del 2013].

[46] Estudio de los componentes del concreto de alto comportamiento [En línea]. Disponible en la web. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5824/Capitulo2.pdf>. [Citado 25 de mayo del 2013].

[47] Norma Técnica Colombiana (NTC) 174. Especificación de los agregados para el concreto.

[48] Manual de prácticas de laboratorio de concreto [En línea]. Disponible en la web. [http://www.fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL\\_LAB\\_DE\\_CONCRETO.pdf](http://www.fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf). [Citado 25 de mayo del 2013].

[49] Norma ASTM C40. Método de Ensayo Normalizado para la Detección de Impurezas Orgánicas en Agregados Finos para Concreto.

[50] Quintero S. González L. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Tesis (2006). Universidad Nacional de Colombia seccional Palmira.

[51] Parrott J.L. “*Waterabsorption in cover concrete*”. Materials and structures (1992) páginas 284-292.

[52] Xiuli Du, LiuJin, Guowei Ma. “*Macroscopic effective mechanical properties of porous dry concrete*”. Cement and Concrete Research 44 (2013) 87–96

# **ANEXOS**

## ANEXO A

### ➤ Diseño experimental del ensayo de compresión

El reporte del programa STATGRAPHICS CENTURION se presenta a continuación, donde en la Tabla 10 se identifica. Clase de diseño: Multi-factor Categórico

**Tabla A 1.** Diseño Multi-factor categórico para la resistencia a la compresión.

<i>Factores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Respuesta</i>
Periodos de Resistencia	3	Resistencia a la compresión
Porcentaje en peso	4	

**Fuente:** STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 10 de 2013

Diseño Base

Número de factores experimentales: 2

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 24

Grados de libertad para el error: 12

### ➤ Diseño experimental del ensayo de tracción

Del programa STATGRAPHICS CENTURION se corroboró el diseño experimental: Clase de diseño: Multi-factor Categórico.

**Tabla A 2.** Diseño Multi-factor categorico para la resistencia a la tracción.

<i>Factores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Respuesta</i>
Periodos de Resistencia	3	Resistencia a la Tracción
Porcentaje en peso	4	

**Fuente:** STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 10 de 2013

Diseño Base:

Número de factores experimentales: 2

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 24

Grados de libertad para el error: 12

➤ **Diseño experimental del ensayo de Flexión**

Del programa STATGRAPHICS CENTURION se corroboró el diseño de experimental: Clase de diseño: Multi-factor Categórico.

**Tabla A 3.** Diseño Multi- factor categórico para la resistencia a la flexión.

<i>Factores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Respuesta</i>
Periodos de Resistencia	1	Resistencia a la flexión
Porcentaje en peso	4	

**Fuente:** STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 10 de 2013

Diseño Base:

Número de factores experimentales: 2

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 8

Grados de libertad para el error: 4

## ANEXO B.

**Figura A 1.** Finura del cemento (Proceso de tamizado del cemento)



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 2.** a. Frasco de Le Chatelier; b. Frasco con la solución de kerosene más 64g de cemento



a. b.

**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 3.** Peso del agregado grueso saturado sumergido en agua; b. Peso del agregado grueso saturado superficialmente seco; c. Peso del agregado grueso seco en el aire.



a.

b.

c.

**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013.

**Figura A 4.** Arena saturada superficialmente seca, para ensayo con el cono



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 5.** a. Peso de la muestra saturada superficialmente seca; b. Peso del Picnómetro más el agua adicionada y la muestra saturada superficialmente seca; c. Peso de la muestra seca.



a.

b.

c.

**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 6.** a. Peso de la muestra de residuo saturada superficialmente seca; b. Peso del Picnómetro más el agua adicionada y la muestra saturada superficialmente seca; c. Peso de la muestra seca.



a.

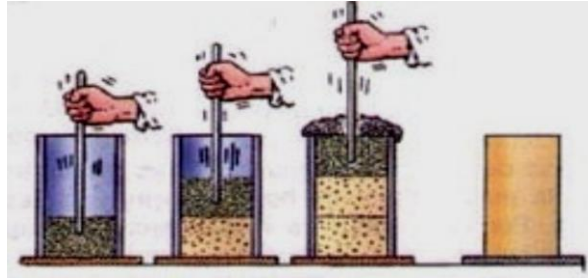
b.

c.

**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013



**Figura A 7.**Distribución y compactación de las capas de concreto.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 8.** Moldes para cilindros y viguetas.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 9.** Piscina de curado de cilindros y viguetas.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 10.** Maquina universal.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 11.** Muestras cilíndricas de la piscina y secadas superficialmente.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 12.** Bandas de neopreno y haz de luz entre la máquina y las bandas con la muestra.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 13.** Ruptura del cilindro.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 14.a.** Ruptura del cilindro; b. platinas de hierro.



a.

b.

**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 15.** Máquina para ensayo de flexión.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

**Figura A 16.a.** Toma de muestra de ensayo de Flexión; b. Ruptura de la vigueta.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

Luego de estos ensayos (compresión, tracción y flexión) se analizaron los cilindros y viguetas para observar en qué forma estaban repartidos los agregados, para comprobar si la muestra es representativa de la mezcla diseñada.

**Figura A 17.** Muestras probadas de compresión y flexión.



**Fuente:** Elaborado en la Presente Investigación. Mayo 18 de 2013

En este caso se observó que estaban repartidos uniformemente y correspondían a una mezcla bien preparada.



## ANEXO C

### ➤ ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (S.E.M).

Este estudio se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP, equipado con sistema de rayos X por energía dispersa OXFORD INCA, operado en el modo alto vacío. Se trabajó sobre las muestras molidas y sin moler recubiertas con oro. Las imágenes observadas se obtuvieron usando detector de electrones secundarios (SE) y detector de electrones retrodispersos (BSE), los contrastes de intensidad que se observan en el modo SE dependen principalmente de la morfología de la muestra, su interpretación es similar a la del objeto visto por encima con iluminación lateral.

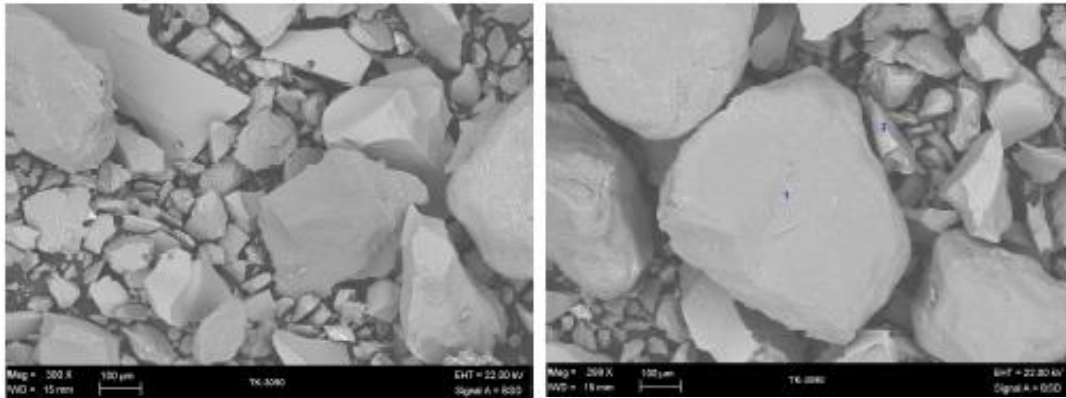
En el modo BSE los contrastes dependen principalmente del número atómico promedio, zonas más claras en BSE corresponden a número atómico promedio elevado, en tanto que las oscuras pertenecen a números atómicos bajos. Los rayos X característicos, por medio de los cuales se identifican los elementos presentes, son emitidos dentro de un rango de profundidades de la muestra que va desde su superficie hasta unas pocas micras. El tipo de detector EDX empleado permite detectar todos los elementos de Z5, que se encuentren en la zona analizada. Las alturas de los picos en los espectros pueden interpretarse de manera preliminar como reflejo de la abundancia relativa de estos elementos en la parte analizada, sin embargo su interpretación cuantitativa está sujeta a una serie de fenómenos que se presentan en la muestra por la interacción de los rayos X con ella y por la probabilidad de ocurrencia de la emisión característica de cada elemento.

Con el fin de minimizar los posibles errores asociados con el proceso de medición el análisis de composición elemental y con las características propias de la superficie de la muestra, se realiza por lo menos diez repeticiones sobre áreas representativas de toda la muestra, se reportan los datos promedio con la incertidumbre evaluada con base en el intervalo de confianza del 95%.

Para las muestras se presenta una imagen de baja ampliación con el fin de mostrar la morfología general, se presentan también imágenes más ampliadas de zonas de interés, junto

con el análisis de composición elemental en la zona analizada. En la parte inferior de las micrografías, junto con la identificación de la muestra y algunos parámetros de operación del microscopio, aparece la línea de escala con la cual puede estimarse el tamaño de las zonas de interés, mm simboliza milímetros y ( $\mu\text{m}$ ) micrómetro.

**Figura A 18.** Aspecto general del Residuo de Granalla de silicato de aluminio



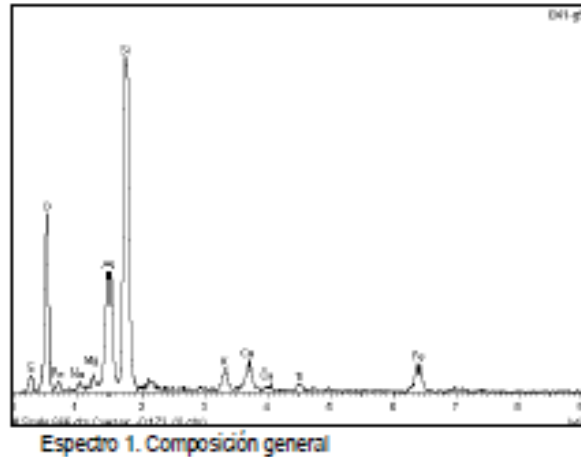
**Fuente:** Suministrado por la empresa que almacena los residuo de granalla de silicato de aluminio.

**Tabla A 4.** .Abundancia Relativa de elementos en el residuo de Granalla de silicato de aluminio.

Elemento	Abundancia Relativa (%)
Carbono	12 $\pm$ 5
Oxígeno	48 $\pm$ 2
Sodio	0.9 $\pm$ 0.2
Magnesio	0.6 $\pm$ 0.1
Aluminio	6.6 $\pm$ 0.9
Silicio	23 $\pm$ 2
Potasio	1.6 $\pm$ 0.3
Calcio	2.0 $\pm$ 0.2
Titanio	Tr
Hierro	4.4 $\pm$ 0.5

**Fuente:** Suministrado por la empresa que almacena los residuo de granalla de silicato de aluminio.

**Figura A 19.** Composición General del residuo de granalla de silicato de aluminio.



**Fuente:** Suministrado por la empresa que almacena los residuo de granalla de silicato de aluminio.

➤ **ANÁLISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).**

La composición general se estudió sobre las muestras sin tratamientos, pulverizadas en mortero de ágata. Se hicieron montajes de polvo desorientado, de acuerdo con el manual de procedimientos técnicos del laboratorio de DRX, UST-DRX-I-010. Esta técnica permite conocer la composición de fases cristalinas, no incluye material amorfo.

La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación de perfiles de difracción o difractogramas de materiales de referencia o materiales puros reportados en las Bases de Datos cristalográficas tomando como referencia que el difractograma de una sustancia pura es como una huella que la identifica. Este análisis se basa en el Método de Hanawalt, en el que cada difractograma se caracteriza por los tres picos de difracción más intensos.

La evaluación de los difractogramas se realizó con ayuda del Software Diffrac Plus, con base en los materiales de referencia de la JCPDF (JointCommitteePowderDiffraction Files) comercializados por el International Centre forDiffraction Data, ICDD1. El análisis semicuantitativo da una estimación de la cantidad de los compuestos cristalinos presentes en



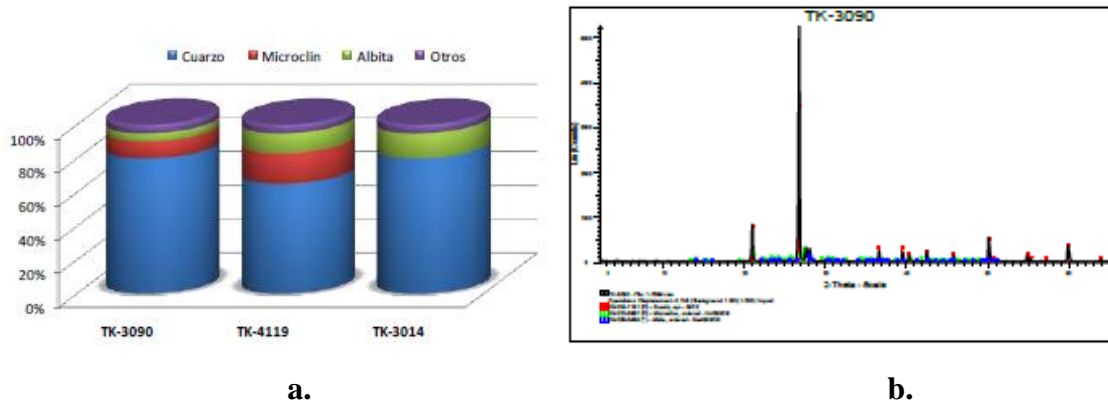
alrededor del 95% en peso de la muestra total con una incertidumbre de alrededor del 2% en fases bien cristalizadas que se encuentren en un porcentaje superior al 5%.

**Tabla A 5.** Fases cristalinas del Residuo de granalla de silicato de aluminio.

Nombre del compuesto	Fórmula	TK-3090	TK-4119	TK-3014
		%Peso	%Peso	%Peso
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	80	65	80
Microclin	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	10	18	ND
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	5	12	15
Otros		5	5	5

**Fuente:** Suministrado por la empresa que almacena los residuo de granalla de silicato de aluminio.

**Figura A 20.** a. Fases cristalinas; b. Difractograma



**Fuente:** Suministrado por la empresa que almacena los residuo de granalla de silicato de aluminio.

## ANEXO D

### ➤ Cálculo para el ensayo de finura del cemento

Para el cálculo de la finura se hizo uso de la siguiente expresión

$$F = \frac{m - R}{m} \times 100$$

$m$ : Peso de la muestra de cemento.

$R$ : Peso de residuos retenidos en el tamiz.

$F$ : Finura del cemento.

Los resultados obtenidos:

Prueba 1

$$F = \frac{50 - 0,4}{50} \times 100$$

$$F = 99,2$$

Prueba 2

$$F = \frac{50 - 0,4}{50} \times 100$$

$$F = 99,2$$

Prueba 3

$$F = \frac{50 - 0,3}{50} \times 100$$

$$F = 99,4$$

Cálculo de la Finura promedio

$$F_{\text{promedio}} = \frac{99,2 + 99,2 + 99,4}{3} = 99,26$$

➤ **Cálculos para el ensayo de Peso Especifica del Cemento**

La diferencia entre las lecturas inicial ( $L_I$ ) y final ( $L_F$ ) representa el volumen de líquido desplazado ( $\Delta V$ ) por el peso del cemento usado en el laboratorio.

Temperatura ambiente= 30°C

Temperatura agua= 20°C

El peso específico se calculó como sigue:

$$\text{Peso Específico del Cemento} = \frac{(64 \text{ g})}{(L_F - L_i)}$$

$(L_F - L_i) =$  volumen desplazado

LECTURA INICIAL: 1 cm<sup>3</sup>

LECTURA FINAL: 22 cm<sup>3</sup>

VOLUMEN DESPLAZADO: 21 cm<sup>3</sup>

$$\text{PESO ESPECIFICO (g/cm}^3\text{)}: \frac{(64 \text{ g})}{(22 \text{ cm}^3 - 1 \text{ cm}^3)} = 3.05 \text{ g/cm}^3$$

## ANEXO E

### ➤ Ensayo de gravedad específica del agregado grueso

#### DATOS

Peso en el aire muestra Seca (A) = 894,7 gr

Peso en el aire muestra S.S.S. (B) = 922,2 gr

Peso en el agua, muestra sumergida (C) = 558,2 gr

#### CÁLCULOS

##### Gravedad específica bulk: A/ (B-C)

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{894,7}{(922,2 - 558,2)} = 2,46 \text{ gr/cm}^3$$

##### Gravedad específica bulk S.S.S: B/ (B-C)

$$\text{Gravedad específica bulk S.S.S} = \frac{922,2}{(922,2 - 558,2)} = 2,53 \text{ gr/cm}^3$$

##### Gravedad específica aparente: A/ (A-C)

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{894,7}{(894,7 - 558,2)} = 2,66 \text{ gr/cm}^3$$

##### Porcentaje de absorción de Agua

$$(B-A)/A * 100$$

$$\text{Absorción} = \frac{(922,2 - 894,7)}{894,7} * 100 = 3,07\%$$

## ANEXO F

### ➤ Ensayo de Gravedad específica de la arena

#### DATOS

Peso seco (A): 486,1g.

Peso del material Saturado Superficialmente Seco (B): 499,7 g.

Peso del picnómetro vacío: 183.3 g.

Peso del picnómetro + material + agua: 983.8 gr

Volumen de agua adicional= Peso del picnómetro + material + agua - Peso del picnómetro vacío – Peso del material Saturado Superficialmente Seco

Volumen de agua adicional (W): 302,7 gr

Volumen del picnómetro (V): 500 cm<sup>3</sup>.

#### CÁLCULOS

Gravedad específica bulk =  $A/(V - W)$

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{486,1}{(500 - 302,7)} = 2,46 \text{ gr/cm}^3$$

Gravedad específico bulk S.S.S =  $B/(V - W)$

$$\text{Gravedad específica bulk S.S.S} = \frac{499,7}{(500 - 302,7)} = 2.53 \text{ gr/cm}^3$$

Gravedad específico aparente:  $A/[(V - W) - (B - A)]$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{486,1}{[(500 - 302,7) - (499,7 - 486,1)]} = 2.64 \text{ gr/cm}^3$$

➤ **Cálculos del porcentaje de absorción de Agua en la arena**

$$[(B - A)/A] * 100$$

$$Absorcion = \frac{(499,7 - 486,1)}{486,1} * 100 = 2,78\%$$

➤ **Ensayo de módulo de finura de la arena**

$$\begin{aligned} \text{Módulo de finura} &= \frac{\sum(\text{Pesos retenidos desde el tamiz N}^\circ 8 \text{ hasta el N}^\circ 100)}{100} \\ &= (2,06 + 11,35 + 41,63 + 82,90 + 95,95)/100 = 234/100 = 2.34 \end{aligned}$$

➤ **Calculo del diámetro promedio de las partículas de la arena**

$$D_p = \frac{1}{\sum \frac{\Delta\phi}{D_{Pi}}}$$

$\Delta\phi$  = porcentaje de fracción retenida

$D_{Pi}$  = Diametro medio aritmetico

$$D_p = \frac{1}{\frac{0,0206}{3,53} + \frac{0,0929}{1,77} + \frac{0,3028}{0,89} + \frac{0,4127}{0,45} + \frac{0,1305}{0,225} + \frac{0,0310}{0,1125}} = 0,46mm$$

➤ **Calculo del diámetro promedio de las partículas del residuo de granalla de silicato de aluminio**

$$D_p = \frac{1}{\frac{0,0716}{3,53} + \frac{0,1987}{1,77} + \frac{0,2956}{0,89} + \frac{0,2117}{0,45} + \frac{0,1282}{0,225} + \frac{0,0572}{0,1125}} = 0,5mm$$

➤ **Ensayo de Gravedad especifica del residuo**

**DATOS**

Peso seco (A): 494,7g.

Peso del material Saturado Superficialmente Seco (B): 499,7 g.

Peso del picnómetro vacío: 183.3 g.

Peso del picnómetro + material + agua: 991 gr

Volumen de agua adicional: Peso del picnómetro + material + agua - Peso del picnómetro vacío – Peso del material Saturado Superficialmente Seco

Volumen de agua adicional (W): 309,9 gr

Volumen del picnómetro (V): 500 cm<sup>3</sup>.

### **CÁLCULOS**

Gravedad específica bulk:  $A/(V - W)$

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{494,7}{(500 - 309,9)} = 2,60 \text{ gr/cm}^3$$

Gravedad específico bulk S.S.S:  $B/(V - W)$

$$\text{Gravedad específica bulk S.S.S} = \frac{499,7}{(500 - 309,9)} = 2.63 \text{ gr/cm}^3$$

Gravedad específico aparente:  $A/[(V - W) - (B - A)]$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{494,7}{[(500 - 309,9) - (499,7 - 494,7)]} = 2.67 \text{ gr/cm}^3$$

### **Porcentaje de absorción de Agua**

$(B-A)/A * 100$

$$\text{Absorción} = \frac{(499,7 - 494,7)}{494,7} * 100 = 1,05 \%$$

### **Comparación entre la gravedad específica de la arena y el residuo**

$$\frac{\left| \text{gravedad específica de la arena} - \frac{\text{gravedad específica del residuo}}{\text{de granalla de silicato de aluminio}} \right|}{\text{gravedad específica de la arena}} \times 100$$

$$\frac{|2,64 - 2,67|}{2,64} \times 100 = 1,14 \%$$

**Ensayo de finura del agregado grueso**

**Módulo de finura** =  $(7,16+27,03+56,59+77,76+90,58)/100 = 259/100 = 2.59$

**Comparación entre la finura de la arena y el residuo**

$$\frac{|finura\ de\ la\ arena - finura\ del\ residuo\ de\ granalla\ de\ silicato\ de\ aluminio|}{finura\ de\ la\ arena} \times 100$$

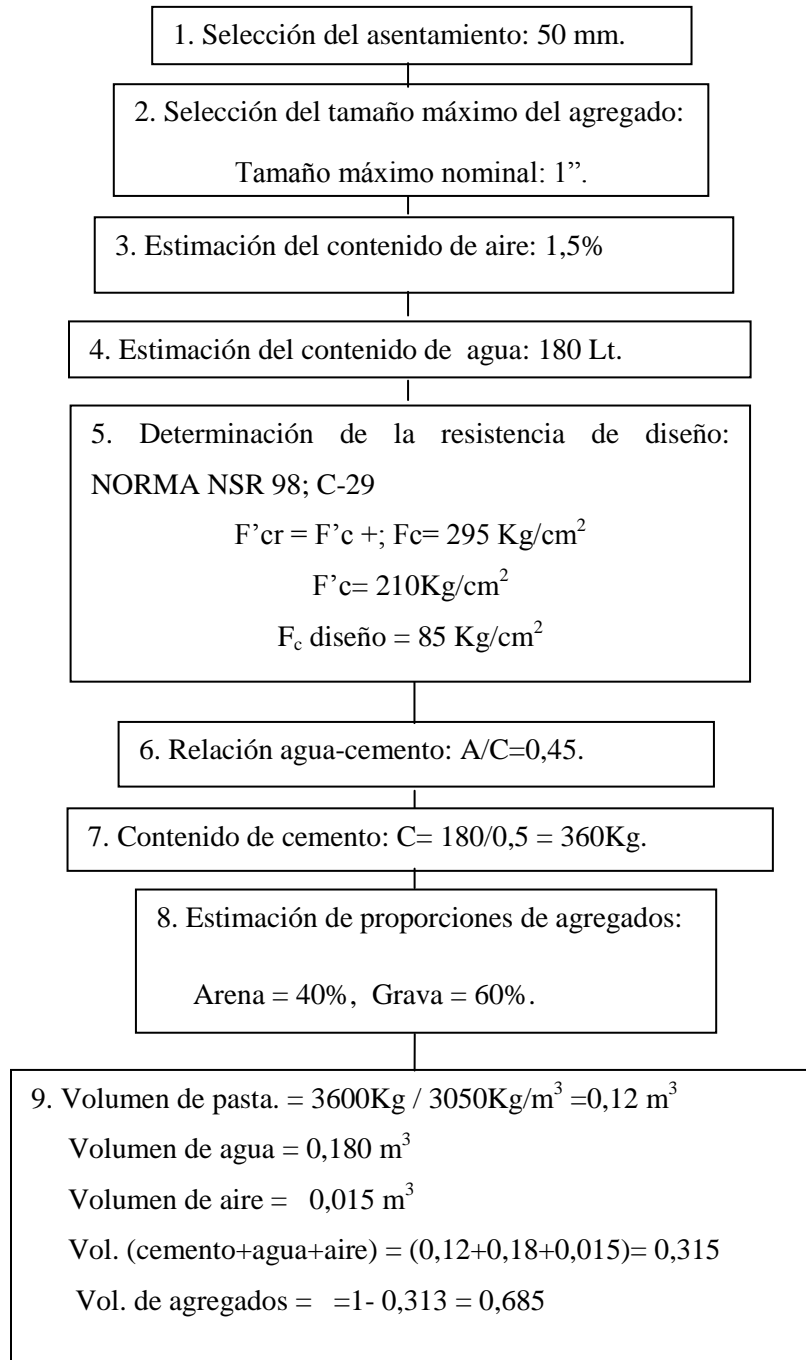
$$\frac{|2,34 - 2,59|}{2,34} \times 100 = 10,68 \%$$



## ANEXO G

### DISEÑO DE MEZCLA

- Cálculo de las cantidades de Triturado- Arena para la muestra patrón, con resistencia de diseño de: 3000 PSI.



10. Peso total del agregado

$$G = \sum (\text{densidad aparente del agregado grueso} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad aparente del agregado fino} \times \% \text{mezcla})$$

$$G = \sum (2646,16 \times 0,4 + 2660 \times 0,6) = 1058,464 + 1596 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso total del agregado} = 2654,464 \times 0,685 = 1818,30 \text{ Kg}$$

11. Calculo del peso del agregado grueso y fino

Peso de la triturado = peso total del agregado x % en la mezcla

Peso de la triturado = 1090,90 kg

Peso de la arena = 727,32 kg

Proporciones en peso:

Cemento = 360/360 = 1

Arena = 727,32 / 360 = 21:2:3

Triturado = 1090,9 / 400 = 3

12. Proporciones de cemento para prueba

$$\frac{360 \text{ Kg}}{5 \text{ Kg}} = 72$$

$$\text{triturado} = \frac{1090,9 \text{ Kg}}{72} = 15 \text{ Kg}$$

$$\text{arena} = \frac{720,32 \text{ Kg}}{72} = 10 \text{ Kg}$$

$$\text{agua} = \frac{180 \text{ Kg}}{72} = 2,5 \text{ Kg}$$

Estas son las cantidades de cemento para el trabajo a una menor proporción. Para los demás cálculos de diseño de mezcla se repitieron los puntos del 1 al 9.

- Calculo de las cantidades de Triturado- Arena- reemplazando el 10% de residuo de granalla de silicato de aluminio, con resistencia de diseño de: 3000 PSI.

10. Peso total del agregado

$$G = \sum (\text{densidad aparente del agregado grueso} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad aparente del agregado fino} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad del residuo de granalla de silicato de aluminio} \times \% \text{mezcla})$$

$$G = \sum (2646,16 \times 0,36 + 2674 \times 0,04 + 2660 \times 0,6) = 952,61 + 106,96 + 1596 \text{ Kg}$$

Peso total del agregado =  $2655,57 \times 0,685 = 1819,06 \text{ Kg}$

11. Calculo del peso del agregado grueso y fino

Peso de la triturado = peso total del agregado x % en la mezcla

Peso de la triturado = 1091,43 kg

Peso de la arena = 654,86 kg

Peso del residuo de Granalla de silicato de aluminio = 72,76

Proporciones en peso:

Cemento =  $360/360 = 1$

Arena =  $654,86/400 = 1,8$

1:2:3

Residuo de granalla de silicato de aluminio =  $72,76/360 = 0,2$

Triturado =  $1091,43/360 = 3$

12. Proporciones de cemento para prueba

$$\frac{360 \text{ Kg}}{5 \text{ Kg}} = 72$$

$$\text{triturado} = \frac{1091,43 \text{ Kg}}{72} = 15 \text{ Kg}$$

$$\text{arena} = \frac{654,86 \text{ Kg}}{72} = 9 \text{ Kg}$$

$$\text{residuo de granalla de silicato de aluminio} = \frac{72,76 \text{ Kg}}{72} = 1 \text{ Kg}$$

$$\text{agua} = \frac{180 \text{ Kg}}{72} = 2,5 \text{ Kg}$$

- Calculo de las cantidades de Triturado- Arena- reemplazando el 30% de residuo de granalla de silicato de aluminio, con resistencia de diseño de: 3000 PSI.

10. Peso total del agregado

$$G = \sum (\text{densidad aparente del agregado grueso} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad aparente del agregado fino} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad del residuo de granalla de silicato de aluminio} \times \% \text{mezcla})$$

$$G = \sum (2646,16 \times 0,28 + 2674 \times 0,12 + 2660 \times 0,6) = 740,92 + 320,88 + 1596 \text{ Kg}$$

Peso total del agregado = 2657,76 x 0,685 = 1820,56 Kg

11. Calculo del peso del agregado grueso y fino

Peso de la triturado = peso total del agregado x % en la mezcla

Peso de la triturado = 1092,33 kg

Peso de la arena = 509,76 kg

Peso del residuo de Granalla de silicato de aluminio = 218,47

Proporciones en peso:

Cemento = 360/360 = 1

Arena = 509,76/360 = 1,4 1:2:3

Residuo de granalla de silicato de aluminio = 218,47/400 = 0,6

Triturado = 1092,33/360 = 3

12. Proporciones de cemento para prueba

$$\frac{360 \text{ Kg}}{5 \text{ Kg}} = 72$$

$$\text{triturado} = \frac{1092,33 \text{ Kg}}{72} = 15 \text{ Kg}$$

$$\text{arena} = \frac{509,76 \text{ Kg}}{72} = 7 \text{ Kg}$$

$$\text{residuo de granalla de silicato de aluminio} = \frac{218,47 \text{ Kg}}{72} = 3 \text{ Kg}$$

$$\text{agua} = \frac{180 \text{ Kg}}{72} = 2,5 \text{ Kg}$$

- Cálculo de las cantidades de Triturado- Arena- reemplazando el 50% de residuo de granalla de silicato de aluminio en la arena, con resistencia de diseño de: 3000 PSI.

10. Peso total del agregado

$$G = \sum (\text{densidad aparente del agregado grueso} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad aparente del agregado fino} \times \% \text{mezcla} \\ + \text{densidad del residuo de granalla de silicato de aluminio} \times \% \text{mezcla})$$

$$G = \sum (2646,16 \times 0,2 + 2674 \times 0,2 + 2660 \times 0,6) = 529,232 + 534,8 + 1596 \text{ Kg}$$

Peso total del agregado =  $2660 \times 0,685 = 1822,1 \text{ Kg}$

11. Cálculo del peso del agregado grueso y fino

Peso de la triturado = peso total del agregado x % en la mezcla

Peso de la triturado = 1093,26 kg

Peso de la arena = 364,42 kg

Peso del residuo de Granalla de silicato de aluminio = 364,42

Proporciones en peso:

Cemento =  $360/360 = 1$

Arena =  $364,42/360 = 11:2:3$

Residuo de granalla de silicato de aluminio =  $364,42/360 = 1$

Triturado =  $1093,26/360 = 3$

12. Proporciones de cemento para prueba

$$\frac{360 \text{ Kg}}{5 \text{ Kg}} = 72$$

$$\text{triturado} = \frac{1093,26 \text{ Kg}}{72} = 15 \text{ Kg}$$

$$\text{arena} = \frac{364,42 \text{ Kg}}{72} = 5 \text{ Kg}$$

$$\text{residuo de granalla de silicato de aluminio} = \frac{364,42 \text{ Kg}}{72} = 5 \text{ Kg}$$

$$\text{agua} = \frac{180 \text{ Kg}}{72} = 2,5 \text{ Kg}$$

## ANEXO H

**Tabla A 6.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 28 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1 (PSI)	Prueba 2 (PSI)	Promedio- media (PSI)
0	1670	1330	1500
10	1365	1313	1339
30	1680	1616	1648
50	543	665	604

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 de 2013

**Tabla A 7.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 7 días.

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
50	2	604,0	X	0 – 10		161,0	363,71
10	2	1339,0	X	0 – 30		-148,0	363,71
0	2	1500,0	X	0 – 50	*	896,0	363,71
30	2	1648,0	X	10 – 30		-309,0	363,71
				10 – 50	*	735,0	363,71
				30 – 50	*	1044,0	363,71

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

La Tabla A 7 muestra la aplicación de la prueba de múltiples rangos para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de las otras. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. Los grupos homogéneos se distinguen según la posición de las X, es decir, si estas se encuentran alineadas en una misma posición existe un grupo homogéneo, por lo tanto para la anterior tabla se muestran dos grupos homogéneos y tres pares de grupos 0%–

50%, 10%– 50% 30 – 50 los cuales muestran diferencia significativa. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

**Tabla A 8.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 14 días.

<b>Sustitución en porcentaje (%)</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Promedio</b>
0	2696,26	1970,25	2333,255
10	1990,78	2062,23	2026,505
30	2165,71	2090,97	2128,34
50	1251,63	1549,75	1004,69

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 de 2013

**Tabla A 9.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 14 días.

<b>Nivel Casos Media</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>	<b>Contraste</b>	<b>Significancia</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>
50 2 1400,7 X		0 – 10		306,75	777,071
10 2 2026,5 XX		0 – 30		204,915	777,071
30 2 2128,3 XX		0 – 50	*	932,565	777,071
0 2 2333,3 X		10 – 30		-101,835	777,071

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

Para este caso solo hay una diferencia estadísticamente significativa representada por los pares que relaciona la muestra patron con la de 50%. Las alineaciones de las X nos indican existen dos grupos homogeneos. De lo anterior se concluye que para 14 dias, los valores

obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión son semejantes excepto cuando se compara el par de 0% y 50%.

**Tabla A 10.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para 28 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1	Prueba 2	Promedio
0	2834,23	2690,51	2762,37
10	2513,11	2109,04	2311,075
30	2720,07	2765,24	2742,655
50	1672,12	1868,41	1770,265

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla A 11.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la compresión de 28 días.

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
50	2	1770,2	X	0 – 10		451,295	465,106
10	2	2311,1	X	0 – 30		19,715	465,106
30	2	2742,7	X	0 – 50	*	992,105	465,106
0	2	2762,3	X	10 – 30		-431,58	465,106

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

Para este caso, solo existe una diferencia estadísticamente significativa representada por el par que relaciona la muestra 0%-50%. Las alineaciones de las X nos indican existen dos grupos homogéneos.



## ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCION

**Tabla A 12.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 7 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1 (PSI)	Prueba 2 (PSI)	Promedio- media (PSI)
0	206,91	173,12	190,02
10	170,93	205,32	188,13
30	216,45	249,45	232,95
50	173,12	134,36	153,74

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla A 13.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 7 días.

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia a	+/- Límites
50	2	153,74	X	0 - 10		1,89	68,8242
10	2	188,125	XX	0 - 30		-42,935	68,8242
0	2	190,015	XX	0 - 50		36,275	68,8242
30	2	232,95	X	10 - 30		-44,825	68,8242
				10 - 50		34,385	68,8242
				30 - 50	*	79,21	68,8242

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

Para este caso, solo existe una diferencia estadísticamente significativa representada por el par que relaciona la muestra 30%-50%. Las alineaciones de las X nos indican existen dos grupos homogéneos.

**Tabla A 14.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 14 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1 (PSI)	Prueba 2 (PSI)	Promedio- media (PSI)
0	255,59	214,46	220,03
10	218,24	238,91	228,58
30	147,28	249,45	242,39
50	147,28	219,23	183,26

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla A 15.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 14 días.

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
50	2	183,255	X	0 - 10		6,45	130,724
30	2	198,365	X	0 - 30		36,66	130,724
10	2	228,575	X	0 - 50		51,77	130,724
0	2	235,025	X	10 - 30		30,21	130,724
				10 - 50		45,32	130,724
				30 - 50		15,11	130,724

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

Para este caso no existe diferencia significativa entre ninguno de los pares

**Tabla A 16.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción para 28 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1 (PSI)	Prueba 2 (PSI)	Promedio- media (PSI)
0	226,26	227,9	227,08
10	232	243,49	245,03
30	246,56	267,08	256,82
50	180,92	219,9	200,41

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla A 17.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la tracción de 28 días

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig. Diferencia	+/- Límites
50	2	200,41	X	0 - 10	-10,665	44,7175
0	2	227,08	XX	0 - 30	-29,74	44,7175
10	2	237,745	XX	0 - 50	26,67	44,7175
30	2	256,82	X	10 - 30	-19,075	44,7175
				10 - 50	37,335	44,7175
				30 - 50	* 56,41	44,7175

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

Para este caso solo existe diferencia estadísticamente significativa representado en el par de las muestras 30% y 50%. Las alineaciones de las X nos indican que existen dos grupos homogéneos. De lo anterior se concluye que para 28 días, los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la tracción son semejantes excepto cuando se compara el par de 30% y 50%.

## ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION

**Tabla A 18.** Valores obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión para 28 días.

Sustitución en porcentaje (%)	Prueba 1	Prueba 2	Promedio
0	365,2	381,8	373,5
10	348,6	348,6	348,6
30	348,6	398,4	373,5
50	265,6	332	298,8

**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 18 del 2013.

**Tabla A 19.** Valores obtenidos de la prueba de múltiples rango para resistencia a la flexión de 28 días.

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia +/-	Límites
50	2	298,8	X	0 - 10		24,9	83,0884
10	2	348,6	X	0 - 30		0,0	83,0884
30	2	373,5	X	0 - 50		74,7	83,0884
0	2	373,5	X	10 - 30		-24,9	83,0884
				10 - 50		49,8	83,0884
				30 - 50		74,7	83,0884

**Fuente:** Programa STATGRAPHICS CENTURION. Mayo 18 del 2013.

Nota: el asterisco (\*) indica un diferencia significativa.

En este caso no hay diferencia significativa para los pares de muestras.

## ANEXO I

Se tomaron 450 g de cada muestra respectivamente, luego se preparó una solución de hidróxido de sodio- agua de 3g/97mL, por último se adicionaron las muestra en esta solución y permanecieron 24 horas, una vez pasada estas 24 horas se observó el grado de impurezas que presentaban las muestras mediante un inspección visual como se muestra en la Figura A 21.

**Figura A 21.**Ensayo de impurezas orgánicas de las muestras. De derecha a izquierda: arena pura, muestra al 10% de sustitución de residuo, muestra al 30% de sustitución de residuo, muestra al 50% de sustitución de residuo, residuo de granalla de silicato de aluminio.



**Fuente:** Elaborada en la presente investigación. Mayo 31 de 2013.

Por tanto se observó que el grado de impureza orgánicas del residuo comparado con el de la arena es mucho mayor ya que su color se torna mucho más oscuro, esto se debe a los diferentes compuestos orgánicos que presenta el residuo que fueron mencionados anteriormente en el ANEXO C, para las muestras se notó que la muestra al 50% de sustitución de residuo presentaba mayor impureza debido a que esta contiene más cantidad de residuo y la que presento menor impureza fue la muestra al 10% de sustitución de residuo porque esta contiene menos cantidad de residuo.