

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GRANO DE CAUCHO DE LLANTA  
RECICLADA EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO PARA LA EMPRESA  
ARGOS

LAURA CAROLINA VENEGAS RAMIREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, DC.  
2016

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GRANO DE CAUCHO DE LLANTA  
RECICLADA EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO PARA LA EMPRESA  
CEMENTERA ARGOS

LAURA CAROLINA VENEGAS RAMÍREZ

Proyecto Integral de Grado para optar el título de  
INGENIERO QUÍMICO

Asesor  
Fernando Moreno  
Ingeniero Químico

Director  
William Javier Andrade Martínez  
Ingeniero Civil

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2016

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Ingeniero Fernando Moreno  
Presidente de Jurado

---

Ingeniero Oscar Camacho  
Jurado 1

---

Ingeniero Felipe Correa  
Jurado 2

Bogotá, Agosto de 2016

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCIA-PEÑA

Decano de Facultad Ingeniería

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Dr. LEONARDO DE JESUS HERRERA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a La Autora

## **DEDICATORIA**

Al primer y más grande ser, a Dios por haberme dado la vida y cada una de las capacidades para cumplir todas las metas que me he propuesto en este camino. Él es el dueño de la vida y de cada triunfo.

A mis padres Martha Esperanza Ramírez y Germán Moreno que han hecho un gran trabajo conmigo y con mis hermanos y a pesar de los errores y de las dificultades jamás se han rendido, por brindarme la oportunidad de cumplir este sueño y por qué han sido un apoyo incondicional hasta el fin, brindándome la más fiel compañía.

A mis hermanos Oscar Leonardo y Sergio Alejandro porque quiero ser su mejor ejemplo y anhelo que luchen por llegar mucho más lejos, tanto como puedan soñar y que cada meta se convierta en un orgullo para todos en la familia.

A mis abuelitos Rafaela Sandoval y Leonardo Ramírez por ser el mejor ejemplo de vida, de trabajo, de entrega y de amor, porque me educaron con paciencia y me enseñaron el valor de la vida, por ser los mejores abuelos que Dios me pudo dar.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la empresa Argos Colombia por abrirme la puerta de sus laboratorios y permitirme llevar a cabo este proyecto, con la colaboración de cada uno de sus trabajadores, especialmente al Ingeniero Diego Velandia y a Luis Carlos Quintero, quienes me brindaron sus conocimientos y experiencia durante el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero William Andrade por haber recibido este proyecto desinteresadamente, por guiarme, brindarme su experiencia y apoyarme en cada paso dado junto con Yamile Mora quien fue de gran ayuda por sus conocimientos.

A mis docentes y asesores, especialmente a la ingeniera Diana Rey y al Ingeniero Fernando Moreno por su tiempo, paciencia y colaboración.

A mis amigos y compañeros que de una o de otra manera hicieron parte del proceso, con sus palabras de ánimo y apoyo.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	19
2 MARCO TEÓRICO	20
2.1 CONCRETO	20
2.1.2 COMPONENTES DEL CONCRETO	21
2.1.2.1 Cemento	21
2.1.2.2 Agregados	21
2.2 LLANTA RECICLADA	22
2.3 MARCO LEGAL	23
2.3.1 DECRETO 442 DE 2015	23
2.3.2 RESOLUCIÓN 6981 de Diciembre 2011	23
2.3.3 RESOLUCIÓN 1457 de Julio de 2010	24
2.3.4 LEY 1333 de Julio de 2009	24
2.3.5 LEY 1259 de Diciembre de 2008	24
3 CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO DE LLANTA TRITURADA	25
3.1 GRANULOMETRÍA	25
3.2 DENSIDAD	29
4 EVALUACION DEL CONCRETO CON GCR	32
4.1 PRUEBAS TÉCNICAS REALIZADAS AL CONCRETO	34
4.1.1 Asentamiento	34
4.1.2 Temperatura	35
4.1.3 Contenido de aire	36
4.1.4 Densidad	37
4.1.5 Rendimiento volumétrico	38
4.1.6 Resistencia	39
4.1.7 Durabilidad 28 días	41
5 DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	45
5.1 ESTADO FRESCO	45
5.2 ESTADO ENDURECIDO	50
5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	57
6. EVALUACIÓN DE COSTOS	66



6.1 COSTOS MATERIAS PRIMAS	66
7 CONCLUSIONES	70
8 RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	79

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición Típica de las Llantas	23
Tabla 2. Granulometría Grano Fino R-30	27
Tabla 3. Granulometría Grano Grueso R-6	28
Tabla 4. Clasificación de los agregados según su tamaño NTC 174	29
Tabla 5. Densidad del Grano Grueso	31
Tabla 6. Densidad del Grano Fino	31
Tabla 7. Evaluaciones para el concreto	34
Tabla 8. Resultados Asentamiento	46
Tabla 9. Clasificación del concreto, según su peso unitario	47
Tabla 10. Resultado Densidad	47
Tabla 11. Contenido total incorporado recomendado para concreto NTC 3318	48
Tabla 12. Resultados Contenido de Aire	48
Tabla 13. Resultados Rendimiento Volumétrico	49
Tabla 14. Resultados Módulo Elástico	51
Tabla 15. Resultados Penetración de Cloruros	53
Tabla 16. Permeabilidad del ion cloruro en el concreto	54
Tabla 17. Resultados Permeabilidad al agua	55
Tabla 18. Clasificación permeabilidad al agua del concreto	56
Tabla 19. Diseño experimental	57
Tabla 20. Resultados Resistencia a la Compresión	58
Tabla 21. ANOVA Resistencia 3000 PSI	63
Tabla 22. ANOVA Resistencia 4000 PSI	64
Tabla 23. Costos insumos concreto convencional 3000 PSI	66
Tabla 24. Costos insumos concreto convencional 4000 PSI	67
Tabla 25. Costos insumos concreto con R-30 de 3000 PSI	67
Tabla 26. Costos insumos concreto con R-30 de 4000 PSI	67
Tabla 27. Costos insumos concreto con R-6 para 3000 PSI	68
Tabla 28. Costos insumo concreto con R-6 para 4000 PSI	68

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Granulometría Grano Fino R-30	27
Gráfica 2. Granulometría R-6 Grueso	28
Gráfica 3. Resultados módulo elástico 3000 PSI	51
Gráfica 4. Resultados módulo elástico 4000 PSI	52
Gráfica 5. Resultados penetración de cloruros 3000 PSI	53
Gráfica 6. Resultados penetración de cloruros 4000 PSI	54
Gráfica 7. Resultados permeabilidad al agua 3000 PSI	55
Gráfica 8. Resultados permeabilidad al agua 4000 PSI	56
Gráfica 9. Resistencia agregado fino 3000 PSI primera tanda	59
Gráfica 10. Resistencia agregado fino 3000 PSI segunda tanda	59
Gráfica 12. Resistencia agregado fino 4000 PSI primera tanda	60
Gráfica 13. Resistencia agregado fino 4000 PSI segunda tanda	60
Gráfica 14. Resistencia agregado grueso 3000 PSI primera tanda	61
Gráfica 15. Resistencia agregado grueso 3000 PSI segunda tanda	61
Gráfica 16. Resistencia agregado grueso 4000 PSI primera tanda	62
Gráfica 17. Resistencia agregado grueso 4000 PSI segunda tanda	62

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Granulometría	26
Figura 2. Diagrama de flujo granulometría NTC 77	26
Figura 3. Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 456	30
Figura 4. Determinación de la densidad del caucho NTC 456.	30
Figura 5. Diagrama de proceso del concreto	33
Figura 6. Diagrama de flujo de la producción del concreto	33
Figura 7. Determinación del asentamiento para el concreto.	34
Figura 8. Diagrama de flujo medida de asentamiento NTC 396	35
Figura 9. Determinación de la temperatura	35
Figura 10. Diagrama de flujo medida de la temperatura NTC 3557.	36
Figura 11. Prueba de contenido de aire.	36
Figura 12. Diagrama de flujo determinación del contenido de aire	37
Figura 13. Determinación de la densidad	38
Figura 14. Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 1926.	38
Figura 15. Prueba de resistencia a la compresión	40
Figura 16. Diagrama de flujo prueba de ensayo a la compresión NTC 673	40
Figura 17. Montaje prueba de módulo elástico estático	41
Figura 18. Diagrama de flujo ensayo del módulo elástico estático	41
Figura 19. Montaje ensayo de penetración de cloruros	42
Figura 20. Diagrama de flujo ensayo penetración de cloruros ASTM C1201	42
Figura 21. Ensayo permeabilidad del concreto al agua	43
Figura 22. Diagrama de flujo ensayo de permeabilidad al agua NTC 448	44

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Cotización concreto convencional 3000 PSI	79
Anexo B. Cotización concreto 3000 PSI	81
Anexo C. Cotización aditivos concreto	82

## GLOSARIO

**CONCRETO:** el concreto es el material resultante de la mezcla de cemento con agregados y agua, para formar una masa similar a una roca la cual es utilizada para estructuras que pueden soportar grandes cargas.

**GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR):** es un material particulado de caucho proveniente de la trituración de llantas desechadas.

**LLANTA O NEUMÁTICO:** es un artículo automotriz que permite el rodamiento del vehículo y soporta su carga, está compuesto por principalmente por Caucho Natural y caucho de Butadieno–Estireno.

**PROPIEDADES DEL CONCRETO:** son las características mínimas propias del concreto que debe presentar para poder ser comercializado como un material de construcción, las cuales se dividen en propiedades en estado fresco y propiedades en estado endurecido.

**PRUEBAS AL CONCRETO:** son ensayos realizados con el fin de verificar las propiedades del concreto para que cumplan con las especificaciones indicadas bien sea en estado fresco o en estado endurecido. Se basan en normas técnicas bien sea colombianas o internacionales.

## RESUMEN

El concreto modificado con grano de caucho de llanta reciclada, es una alternativa para producir concretos modificados con una materia prima que proviene de un desecho que es muy abundante en la actualidad, las llantas desechadas. Es bien sabido que la industria de la construcción es una de las más fuertes en este momento en Colombia, pero también es conocido que la arena utilizada proviene de canteras, es decir, de las montañas lo que traduce en un deterioro del medio ambiente, es por esto entonces que el concreto con grano de caucho de llanta reciclada (GCR) tiene un valor agregado ya que disminuye el consumo de una materia prima no renovable por una materia prima que proviene del reciclaje.

En el presente trabajo de grado se desarrolla un análisis de las propiedades mecánicas del concreto modificado con llanta triturada en contraste con las propiedades de un concreto convencional, dejando ver los beneficios y las desventajas de este producto. Entre las características más requeridas en el mercado, se encuentra la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto, evaluadas todas por medio de procedimientos descritos en las Normas Técnicas colombianas (NTC) que rigen específicamente los procesos de producción y control de calidad del concreto como la NTC 77 CONCRETOS. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (2007) segunda actualización, NTC 174 especificaciones de los agregados para concretos (2000) quinta actualización, NTC1032 método de ensayo para determinar el contenido de aire en el concreto fresco. Método de presión (1994) primera actualización y la ASTM C1201 indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir iones de cloruro (2012), entre otras.

Los resultados de acuerdo a la evaluación realizada y de acuerdo a los antecedentes publicados en trabajos como tesis y artículos consultados a modo de referencia, por ejemplo el trabajo de grado publicado por el ingeniero Hermes Torres para la Escuela de Ingenieros donde realiza una evaluación a las propiedades mecánicas del concreto con porcentajes de reemplazo hasta del 30%, determinan que la resistencia tiende a disminuir considerablemente al aumentar el porcentaje de reemplazo, sin embargo al utilizar bajos porcentajes su caída no es impactante y puede ser una excelente opción para darle un buen manejo a las llantas de desecho contribuyendo de esta manera a solucionar el problema por contaminación que se genera al no disponer de estas.

Dentro de los principales resultados, comparando un concreto con 0% de reemplazo de GCR contra un concreto con 20% de reemplazo, se encuentra que la resistencia tuvo una caída promedio del 20%, para un concreto de 300 PSI utilizando grano de caucho fino, mientras que para el mismo diseño de resistencia, utilizando grano grueso la caída promedio fue del 32%. De igual manera se hace evidente a lo largo de la experimentación que para porcentajes de bajos reemplazos las propiedades tienen variaciones menos significativas, bien se para

concretos con resistencias de 3000 PSI o concretos con resistencias de 4000 PSI. Sin embargo la penetración a cloruros es una de las propiedades que por el contrario presento una mejora, para este caso la penetración disminuye lo que indica que el concreto con GCR tiene una mejor protección a la corrosión por iones cloruro, para las estructuras metálicas que se incorporan cuando se requiere, es decir que impide el paso de cloruros al interior de la estructura, la disminución para un concreto de 3000 PSI con grano de caucho fino es de 35% y para un concreto de 3000 PSI utilizando el mismo tipo de grano la disminución es del 33%

**PALABRAS CLAVE:** Concreto, GCR (grano de caucho de llanta reciclada), resistencia del concreto, durabilidad del concreto.



## INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción en Colombia representa un fuerte motor para el desarrollo y el crecimiento económico del país. Según Sandra Ferro, presidenta de la Cámara Colombiana de la Construcción “La construcción se consolidó así como el motor de la economía, poniendo en evidencia el creciente rumbo de la inversión de las firmas y los hogares en ese sector”<sup>1</sup>. Colombia ha venido sufriendo un fenómeno de crecimiento urbanístico, lo cual ha obligado al sector de la construcción a crecer a pasos agigantados y representa un gran aporte para el PIB del país, con un crecimiento del 87% en el primer trimestre del año 2015. Dentro de los materiales de construcción más importantes se encuentra el concreto, el cual ha motivado a ingenieros civiles, mecánicos, químicos entre otros, a dirigir sus investigaciones en torno a la evaluación de sus propiedades y en busca de mejorarlas con la modificación por medio ya sea de adiciones o reemplazos de los agregados comúnmente usados en su diseño. A su vez el crecimiento de Colombia involucra otros aspectos como incremento de tecnología, la ampliación del parque automotor entre otras que no siempre son tan beneficiosas para nuestro país como la deforestación y el impacto ecológico que deteriora los paisajes naturales de la biodiversidad propia de la zona tropical donde se encuentra ubicada Colombia. Por esta razón el desarrollo tecnológico debe ir de la mano con el desarrollo cultural y de investigación y se debe brindar gran variedad de productos de excelente calidad y de costos bajos.

El concreto siendo uno de los materiales más utilizado en la construcción hoy en día puede ser producido a partir de diversos insumos y sus propiedades se adaptan a las necesidades del cliente. Por esta importante razón surge la necesidad de innovar con materiales de construcción, en primera medida con excelentes índices de calidad y en segunda medida que brinden un aporte al medio ambiente. Es así como nace la idea de utilizar materiales de desecho reutilizables como reemplazo de la materia prima. Las llantas por su parte son un problema medio ambiental que se ha convertido poco a poco en una oportunidad muy amplia para innovar en el mercado con productos reciclados para fabricar sillas, cubiertas, suelas para zapatos, tapetes, entre otros, incluyendo una nueva aplicación muy estudiada en los últimos tiempos como lo es la incorporación de material particulado de llanta reciclada en el asfalto y en el concreto.

---

<sup>1</sup>REDACCIÓN DE EL PAÍS. Sector de la construcción, motor del crecimiento de la economía. En: El País. Cali. 18, Mayo, 2015, p \_\_\_\_.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada en la producción de concreto para la empresa Argos.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el grano de caucho de llanta reciclada GCR para ser usado en el concreto.
- Realizar la evaluación del concreto con GCR por medio de las pruebas técnicas requeridas.
- Desarrollar el diseño experimental para las mezclas de concreto previamente realizadas.
- Realizar una evaluación de costos del proceso de producción de concreto con GCR.

## 1. DESCRIPCION DE LA EMPRESA

Concretos Argos es una empresa colombiana que tiene ya 80 años de experiencia en la industria de cementos. En el negocio del concreto da sus inicios el 22 de enero de 1950 cuando se montan los primeros tres mezcladores de concreto en la ciudad de Medellín. Argos es líder en Colombia y tercer productor más grande en Estados Unidos. Cuenta con 388 plantas ubicadas en Colombia, Estados Unidos, Haití, Panamá, República Dominicana y Surinam. La capacidad instalada total es de 18 millones de metros cúbicos de concreto al año, Argos se caracteriza porque basa su producción en el desarrollo sostenible, es decir, que sea económicamente viable, respetuoso de las personas, responsable y amigable con el medioambiente.

Esta empresa cuenta con un área de investigación y de innovación, dedicada a experimentar con nuevos productos disponibles en el mercado como aditivos y agregados diversos, para la mejora o elaboración de nuevos productos. En Colombia se encuentran dos centros de desarrollo uno ubicado en la ciudad de Medellín y otro en la ciudad de Bogotá en la planta del sector de puente Aranda.

El área de investigación e innovación de Argos es un grupo de trabajo dedicado a la exploración de nuevos materiales y métodos para la preparación del concreto con el fin de ofrecer a sus clientes productos con valor agregado y con características diferentes que se acoplen a sus necesidades pero sin dejar a un lado la calidad que los representa. El laboratorio de innovación de Argos cuenta con un área de 18.744 m<sup>2</sup> y adecuadas condiciones físicas, tecnológicas, ambientales y de seguridad, consecuentes con el modelo de negocio de Argos, centrado en el cliente y en el desarrollo sostenible y opera de forma responsable y amigable con el medio ambiente, con actividades como: cero vertimientos, reciclaje de residuos, reutilización de agua en el proceso y control de emisiones, ruido y material particulado.

La planta cuenta con un completo laboratorio dotado de un cuarto de mezclas, un cuarto de curado y equipos especializados para realizar control de calidad, diseño de nuevos concretos, evaluaciones de resistencia la compresión, flexión, módulo elástico estático, permeabilidad al agua, penetración de cloruros entre otros.

## 2. MARCO TEÓRICO

Comprender el comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada requiere conocer con antelación a grandes rasgos lo relacionado con el concreto y el material de interés que será empleado como agregado fino en la mezcla, en este caso el GCR. En este capítulo se encuentra información de interés acerca del concreto, sus componentes y la llanta como material de reciclaje.

### 2.1 CONCRETO

Como ya se ha mencionado el concreto es una mezcla que contiene agregados finos como la arena, agregados gruesos como la gravilla y un aglomerante que es el cemento generalmente tipo Portland. Al reaccionar la pasta de cemento con el agua, el concreto se endurece obteniendo una apariencia similar a una roca. Cuando el concreto está fresco se le puede dar cualquier forma y una vez se endurece tiene las características de ser durable en el tiempo y de resistir esfuerzos mecánicos como la compresión.<sup>2</sup>

El concreto presenta dos fases, una continua que es la pasta formada por cemento, agua y aire denomina de esta manera porque siempre está en contacto con si misma a lo largo de toda la mezcla. Y una fase discontinua que la componen los agregados que pueden ser finos y gruesos y es llamada de esta manera dado que sus partículas no se encuentran en contacto unas con otras.<sup>3</sup>

Dentro de las características del concreto encontramos que para el concreto en estado fresco es importante que sea plástico, semifluido, tenga fácil trabajabilidad, buena consistencia, segregación, cohesión y sobretodo sea fácil de moldear.<sup>4</sup> Mientras que en estado endurecido se puede decir que su característica más importante es la resistencia a la compresión es decir la capacidad de soportar grandes cargas, adicionalmente esta característica depende de factores como la vida útil del concreto, la relación agua cemento y el grado de compactación de los

---

<sup>2</sup> GARCIA CABRERA, María Alejandra. Factibilidad de sustituir el agregado fino del concreto por fibras de termoplásticos y elastómeros reciclados. Tesis de grado. Ingeniería Mecánica. 2007, p \_\_\_\_.

<sup>3</sup> Ibid., p. \_\_\_\_.

<sup>4</sup> HERRERA SOSA, E. S., MARTÍNEZ BECERRA, G., BARRERA DIAZ, C., & CRUZ ZARAGOZA, E. Materiales Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto. Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción. España: OmniaScience, 2011, p \_\_\_\_.

agregados entre otros. También es importante la permeabilidad, el módulo de elasticidad estático y los cambios de volumen y temperatura.<sup>5</sup>

El tipo de cemento utilizado para la fabricación de concreto es el cemento tipo portland y los agregados más comunes son arena y gravilla. Sin embargo en la industria encontramos una gran variedad de concretos, cada uno presenta una característica particular o un beneficio adicional de acuerdo a la necesidad del cliente que lo requiere. Como ejemplo encontramos que la empresa Argos ofrece tres grandes grupos de concretos, los avanzados, los especiales y los convencionales, y estos a su vez se subdividen en productos más específicos para determinada población del mercado.

2.1.1 Componentes del concreto. Como ya se ha dicho el concreto es una mezcla de elementos, a continuación se presentan los componentes que hacen parte de una mezcla convencional de concreto.

2.1.1.1 Cemento. En la formulación del concreto el cemento más comúnmente usado es el cemento tipo Portland, el cemento es un aglomerante hidráulico que procede de la calcinación de materiales arcillosos y una posterior de molienda en el llamado “Clinker” con una proporción menor al 1% de yeso. El cemento al ser mezclado con agua reacciona y forma una pasta que con el transcurso de un corto tiempo incrementa su resistencia y se va volviendo rígida como si fuese una roca.<sup>6</sup>

2.1.1.2 Agregados. Los agregados son partículas que generalmente trabajan como inertes de origen natural o artificial, usadas para la mezcla del concreto. Los agregados se pueden clasificar en dos grupos que se definen por su diámetro de partícula, las partículas que se seleccionan por medio de una malla número 4, aproximadamente 4.75 mm y son retenidas en ella se denominan los agregados gruesos y por otro lado los agregados finos son aquellas partículas que quedan retenidas en una malla número 200 de 0.075 mm.<sup>7</sup>

2.1.1.3 Grano de caucho de llanta reciclada (GCR).El GCR es el resultado del reciclaje y la trituración de las llantas bien sea de desecho o que no cumplen las características que pide la norma para su venta. El GCR en la actualidad es

---

<sup>5</sup>JOO HERRAN, Gonzalo. Comportamiento del concreto con el aditivo plastificante-reductor de agua y retardante de fragua EUCO WR51.Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Universidad de Piura,2003, p \_\_\_\_.

<sup>6</sup> JOO HERRAN, Op., Cit., p. \_\_\_\_.

<sup>7</sup> Redacción Cali. Crean planta para reciclar llantas del Eje Cafetero y el Suroccidente. En: El tiempo. Cali. 17, Noviembre, 2014

usado en mezclas asfálticas para pavimentación de vías, para elaboración de parques infantiles y canchas sintéticas, como materia prima para fabricación de suelas para calzado, entre otras.<sup>8</sup>

## 2.2 LLANTA RECICLADA

El reciclaje de llantas para la obtención del GCR se lleva a cabo en las siguientes fases: Una primera fase obligatoria llamada fase destalonadora, aquí se extrae los anillos de acero que se encuentran en el interior de la llanta (en el talón o borde) y se recupera la lona. Una segunda fase de trituración primaria, en la que las llantas se reducen a cortes de 50X50 mm aproximadamente y de acuerdo a las condiciones de la máquina. Y finalmente dos fases posteriores una de pre-granulación en la que se obtienen granos de tamaño de 10 a 8mm y por último una fase de pulverización que ofrece un tamaño de polvo de malla 30-80. Las fases se seleccionan de acuerdo a la necesidad y requerimientos del cliente.<sup>9</sup>

Debido a que el material de interés es el caucho es importante conocer la composición típica de las llantas de acuerdo con el destino para el cual se elaboró, existen variaciones en estas composiciones y se deben a las normas implementadas en cada país así como lo estipulado en cada empresa productora, según el Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A, las composiciones típicas para las llantas se pueden observar en la tabla 1.

---

<sup>8</sup> TORRES OSPINA, Andrés Hermes. Valoración de las propiedades mecánicas del Asfalto Modificado con grano de llanta reciclado. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad de Ingeniería, 2014. p \_\_\_\_.

<sup>9</sup> Artículo Planta trituradores de llantas. Industrias Gercons Colombia- Productos plantas trituradoras de llantas [En línea]. Disponible en: <<http://www.gerconscolombia.com/index.php/productos/plantas-trituradoras-de-llantas>> [Citado el 12 de marzo de 2016].

**Tabla 1.** Composición Típica de las Llantas (Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A)

Componentes	Tipo de vehículo		Función
	Automóviles % en peso	Camiones % en peso	
Caucho	48	45	Estructura/deformación
Negro de humo	22	22	Mejora oxidación
Óxido de zinc	1,2	2,1	Catalizador
Material textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Azufre	1	1	Vulcanización
Otros	12	0	Juventud

Las llantas son un producto de alto impacto en la contaminación, general problemas de contaminación visual y son focos de infecciones en los acopios, además sus compuestos son altamente contaminantes y grandes generadores de emisiones cancerígenas cuando son quemados.

### 2.3 MARCO LEGAL

Esta sección describe las normas vigentes que rigen los temas relacionados con el manejo y control de las llantas residuales, así como el reciclaje de las mismas y su uso reglamentario en la producción de asfaltos.

2.3.1 DECRETO 442 DE 2015. Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital, dirigido a todos los sectores que estén relacionados con la fabricación y venta de llantas, así como quienes desarrollen proyectos de construcción con asfalto modificado con GCR. Por su parte la secretaria de ambiente se ve obligada a coordinar las acciones para asegurar el cumplimiento del decreto y asegurar el seguimiento y el control de los proyectos que hagan parte del programa de aprovechamiento de llantas usadas.

2.3.2 RESOLUCIÓN 6981 de Diciembre 2011. En la que se dictan los lineamientos para el aprovechamiento de las llantas y neumáticos usados y llantas no conformes en el Distrito Capital. Determina que cualquier persona que ejecute una obra de infraestructura pública tiene como obligación hacer uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Acuerdo 257(27 de Diciembre de 2011).Por lo cual se dictan normas basicas sobre la estructura, organización y funcionamientos de los organismos y de las entidades de Bogota, distrito capital, y se expide otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2011.

2.3.3 RESOLUCION 1457 de Julio de 2010. En la que se direcciona el reciclaje de llantas fuera de uso. Prohíbe a las empresas y particulares el abandono o eliminación incontrolada de llantas usadas, ocupar el Espacio Público, depositarlas en rellenos sanitarios, enterrarlas, acumularlas a cielo abierto o incinerarlas. Y exige la implementación de Sistemas de Recolección Selectiva de las llantas fuera de uso por parte de los Productores e importadores de llantas en Colombia.<sup>11</sup>

LEY 1333 de Julio de 2009. En la que se dicta el procedimiento sancionatorio ambiental. Contiene el Procedimiento sancionatorio Ambiental en Colombia, para cualquier persona o empresa que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana. Contempla sanciones tales como “multas diarias hasta por cinco mil (5.000) salarios mínimos mensuales legales vigentes; cierre temporal o definitivo del establecimiento, edificación o servicio; revocatoria o caducidad de licencia ambiental; orden para restaurar el medio ambiente o los recursos afectados, entre otros”.<sup>12</sup>

2.3.4 LEY 1259 de Diciembre de 2008. En la que se encuentra el comparendo ambiental. Aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros. Impone sanciones a las personas y empresas que cometan faltas como: “Disponer residuos sólidos y escombros en sitios de uso público, arrojar basura y escombros a fuentes de aguas y bosques, Realizar quema de basura y/o escombros sin las debidas medidas de seguridad...” Estas sanciones pueden ser impuestas por la Policía Nacional. <sup>13</sup>

---

<sup>11</sup> COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1280.( 29 de Julio de 2010).Por lo cual se establece la escala tarifaria para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2009.

<sup>12</sup>COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1333.( 21 de Julio de 2009). Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2009.

<sup>13</sup>COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1259.( 19 de Diciembre de 2008). Por lo cual se crea e implementa el Comparendo Ambiental. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2008.



### **3. CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO DE LLANTA TRITURADA**

Cada año en Bogotá según cifras oficiales tres de cada diez llantas, de un reporte de 2'500.000 llantas que cumplen su vida útil al año no se recogen debidamente y son desechadas en fuentes hídricas, enterradas en rellenos sanitarios, quemadas a cielo abierto o arrojadas a las calles, es decir al día se desechan cerca de 2.050 llantas, representando daños en el medio ambiente y problemas de salubridad pública, ya que, por ejemplo, al quemar estas llantas se producen emisiones que provocan cáncer. Adicional a esto se hace evidente que el parque automotor en el país continúa creciendo y a su vez cada día se desechan más llantas que pueden ser reutilizadas. Según reporta el IDU con 250 llantas se puede producir una tonelada de grano de caucho de llanta reciclada o GCR.

En Colombia existen ya varias empresas dedicadas al reciclaje de llantas, entre ellas esta Grupo Renova, una empresa localizada en el sector de Cazucá, municipio de Soacha, dedicada a producir grano de caucho de llanta reciclada en diferentes especificaciones. El GCR se puede producir a partir de cualquier tipo de llanta de automóvil, sin importar su tamaño, adicionalmente se puede obtener en diferentes tamaños de grano, es por esta razón que en el presente capítulo se describen los procedimientos para realizar la caracterización del GCR por medio de una granulometría y un ensayo de densidad.

Para esta evaluación se seleccionaron dos tamaños de grano de los que ofrece la empresa Grupo Renova, el criterio de selección se debe a la cantidad de producción, es decir, las referencias de Grano R-6 y R-30 son las de mayor producción por lo tanto serán las que tengan mayor facilidad para ser adquiridas como materia prima.

#### **3.1. GRANULOMETRÍA**

El tamaño de las partículas de los diferentes agregados como, arena, grava o agregado ligero GCR tienen una afectación importante en la dosificación dentro del diseño del concreto. Mediante una evaluación granulométrica para seleccionar el material como un agregado fino o agregado grueso se realizó la caracterización del material particulado de llanta reciclada, aplicando la NTC 77 Concreto, método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (2007) segunda actualización, donde se describen los procesos necesarios para realizar un análisis granulométrico y la NTC 174 especificaciones de los agregados para el concreto (2000) quinta edición, en la que se encuentra la caracterización de los agregados usados para el concreto de acuerdo a sus propiedades físicas.

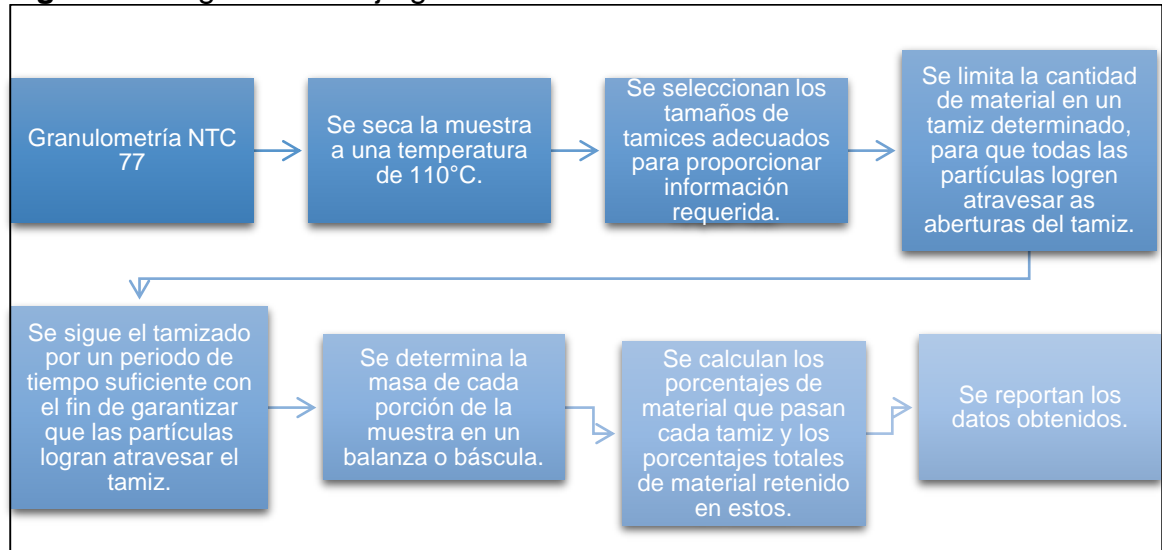
El ensayo de granulometría para el GCR se realizó en el laboratorio de argos y para este se utilizó un tamiz inicial de 3/8" y se finalizó con un tamiz número 200, como se puede observar en la figura 1. Adicionalmente se utilizó una balanza y

recipientes para separar y pesar el material retenido en cada una de las mallas. El procedimiento descrito por la norma se puede observar en la figura 2.

**Figura 1. Granulometría**



**Figura 2. Diagrama de flujo granulometría NTC 77**

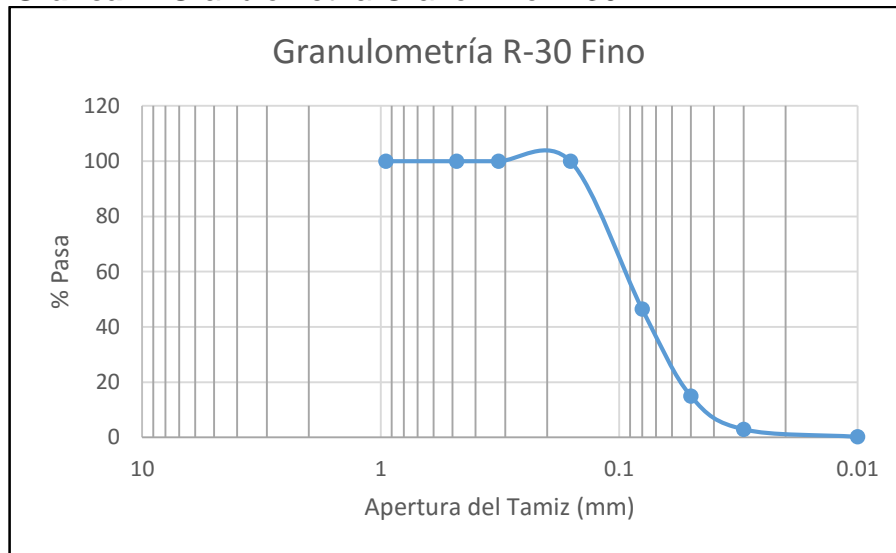


Los resultados se evidencian en la tabla 2 para grano fino R-30 donde se encuentra la información correspondiente a la granulometría y la respectiva gráfica 1 mediante la cual se puede analizar los diferentes tamaños de partícula y los porcentajes que se encuentran de estos tamaños dentro de la muestra. De este análisis granulométrico se puede inferir que existe un rango de tamaños de partícula entre 0,16 mm y 0,075 mm, predominando con un 53,5% de masa retenida en el tamiz N0. 30 que tiene un tamaño de partícula nominal de 0,16 mm.

**Tabla 2.** Granulometría Grano Fino R-30

No. Tamiz	Tamaño de partícula(mm)	Masa (g)	Masa (%)	% Retenido acumulado	% Pasa
3/8	0,95	0,0	0,00	0,00	100,00
4	0,48	0,0	0,00	0,00	100,00
8	0,32	0,0	0,00	0,00	100,00
16	0,16	0,2	0,04	0,04	99,96
30	0,08	267,4	53,51	53,55	46,45
50	0,05	157,3	31,48	85,03	14,97
100	0,03	60,2	12,05	97,08	2,92
200	0,01	13,5	2,70	99,78	0,22
FONDOS		1,1	0,22	100,00	0,00
TOTAL		499,7	100,00	435,48	464,52

**Gráfica 1.** Granulometría Grano Fino R-30

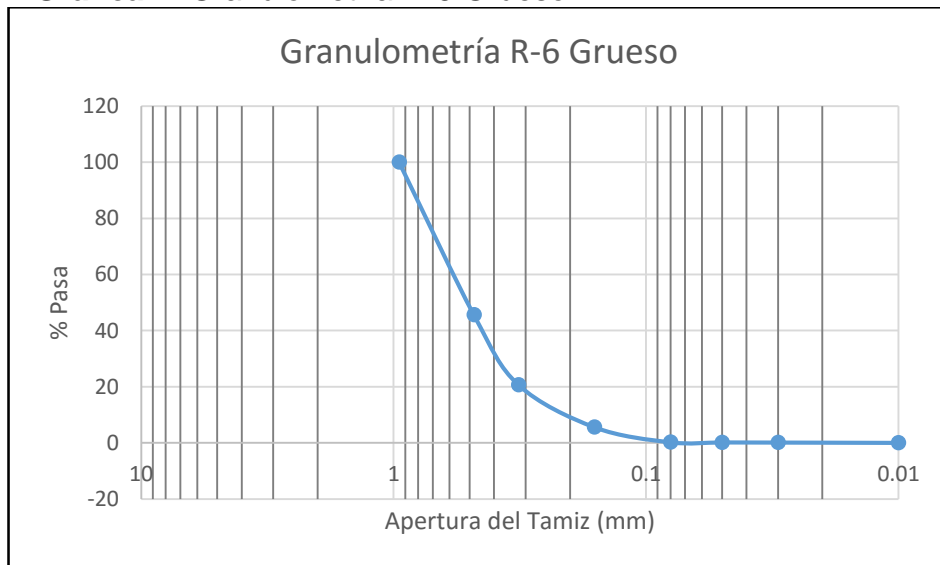


De igual manera para grano grueso R-6 los resultados de la granulometría se reportan en la tabla 3 y su respectiva gráfica 2 en la cual se puede observar que el rango para los tamaños de partícula de esta muestra van desde 0,48 mm hasta 0,075 mm, con una predominancia 54% de retención de masa en el tamiz No. 4 con un tamaño nominal de partícula de 0,48 mm.

**Tabla 3.** Granulometría Grano Grueso R-6

No. Tamiz	Tamaño de partícula(mm)	Masa (g)	Masa (%)	% Retenido acumulado	% Pasa
3/8	0,95	0	0,00	0,00	100,00
4	0,48	271,4	54,41	54,41	45,59
8	0,32	124,2	24,90	79,31	20,69
16	0,16	75,4	15,12	94,43	5,57
30	0,08	26,8	5,37	99,80	0,20
50	0,05	0,2	0,04	99,84	0,16
100	0,03	0,2	0,04	99,88	0,12
200	0,01	0,6	0,12	100,00	0,00
FONDOS		0	0,00	100,00	0,00
TOTAL		498,80	100,00	727,67	172,33

**Gráfica 2.** Granulometría R-6 Grueso



Basados en la información descrita anteriormente se puede concluir que el grano grueso y el grano fino se encuentran clasificados dentro del rango de las arenas puesto que las partículas se retienen entre el tamiz No. 4 con tamaño nominal de partícula de 0,48 mm y el tamiz No. 200 con tamaño nominal de partícula de 0,03 mm, es decir presentan un comportamiento como agregado fino y es posible utilizarlos en una mezcla de concreto, esto se corrobora en la tercera fila de la tabla 4 de la NTC 174 Especificaciones de los agregados para los concretos (2000) quinta actualización, que describe la clasificación de agregados según su tamaño.

**Tabla 4.** Clasificación de los agregados según su tamaño NTC 174

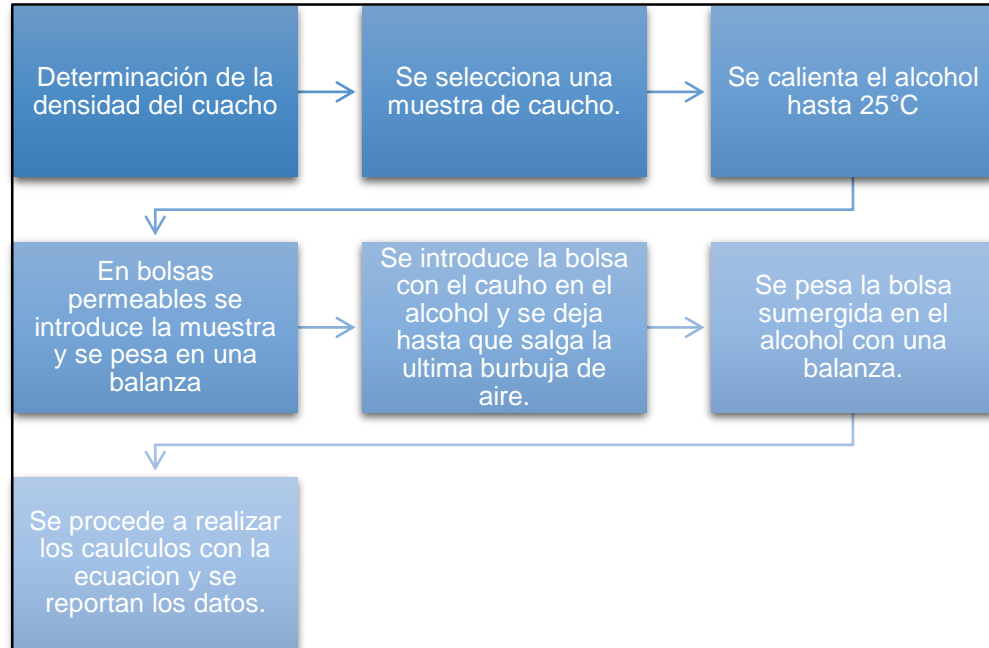
Tamaño en mm	Denominación más común	Clasificación	Uso de agregados de mezclas
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0,002 – 0,074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0,074 – 4,76 #200 - #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4,76 – 19,1 #4 - ¾"	Gravilla		Material apto para concreto
19,1 – 50,8 ¾" – 2"	Grava		Material apto para concreto
50,8 – 152,4 2" – 6"	Piedra	Agregado grueso	
> 152,4 6"	Rajón, Piedra Bola		Concreto ciclópeo

### 3.2. DENSIDAD

La segunda parte de la caracterización del grano de caucho de llanta reciclada consta de un ensayo de densidad que fue desarrollado bajo los parámetros de la NTC 456 Caucho vulcanizado. Determinación de la densidad (1971) primera actualización. La densidad es un parámetro que interviene en la determinación de las relaciones de agregados, agua y cemento, ya que dentro de este material pueden existir porosidades que afecten la adherencia y la densidad propia del concreto ya mezclado. Para el desarrollo de este ensayo fue necesario utilizar los siguientes insumos y equipos, el procedimiento se puede verificar en la figura 3:

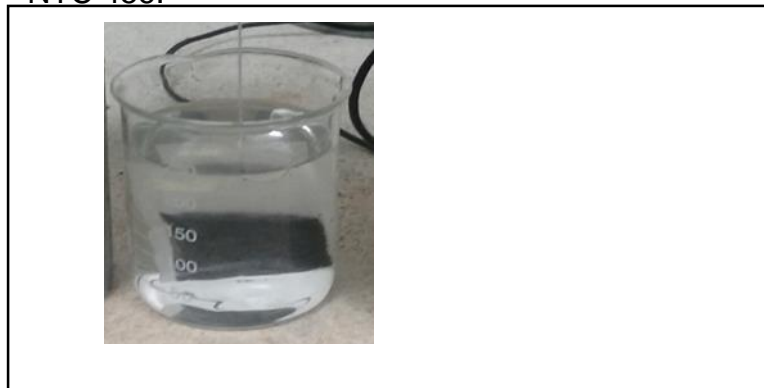
- Balanza
- Vasos de precipitado
- Bolsas permeables
- Muestra de agregados
- Alcohol

**Figura 3. Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 456**



En la figura No. 4 se observa como debe ser sumergida la muestra para obtener pesos correctos. A continuación se encuentran la ecuación No. 1 empleada para determinar la densidad del caucho, además de los resultados en las tablas 5 y 6 respectivamente para cada tipo de grano.

**Figura 4. Determinación de la densidad del caucho NTC 456.**



**Ecuación 1. Densidad a 25°C**

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} * p$$

Donde:

$m_1$ : Masa neta del caucho (g)

$m_2$ : Masa de la muestra sumergida en alcohol (g)

$\rho$ : Densidad del alcohol (25°C) (g/cm<sup>3</sup>)

**Tabla 5** Densidad del Grano Grueso

Ensayo	1
$m_1$ (g)	2,89
$m_2$ (g)	0,44
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,73
Densidad a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,86

**Tabla 6** Densidad del Grano Fino

Ensayo	2
$m_1$ (g)	3,04
$m_2$ (g)	0,3
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,73
Densidad a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,81

Así como se esperaba las densidades de los dos tipos de GCR son similares, en primera medida por su comportamiento como agregado ligero y adicionalmente por que provienen de un mismo material el cual es la llanta. Esto es un buen rasgo en el agregado, pues al tener una baja densidad no afectara la densidad propia del concreto, ya que si se tiene una densidad muy alta la densidad del concreto va a aumentar y lo ideal es obtener concretos que no tengan densidades altas es decir que no se clasifiquen como concretos pesados.

#### 4. EVALUACIÓN DEL CONCRETO CON GCR

Como una alternativa para darle uso al grano de caucho de llanta reciclada se propone diseñar una línea de concreto en la cual se reemplace parte del agregado fino por este GCR. Hoy en día son muchas las opciones que se encuentran en el mercado en cuanto a concretos modificados, se pueden obtener concretos cerámicos, poliméricos y convencionales, entre muchos otros, cada uno de ellos tiene un diseño específico de acuerdo a las necesidades del cliente. La oportunidad de diseñar una línea de concreto en la que se utilice GCR es una puerta abierta para incursionar en el mercado con un producto de valor agregado por utilizar un material de desecho como materia prima y que puede ofrecer propiedades mecánicas similares al concreto convencional<sup>14</sup>.

La mezcla de concreto convencional en la que se basó este diseño contiene agua, cemento, arena, grava y aditivos dependiendo de la resistencia. Para la mezcla de concreto de 3000 PSI se agrega un aditivo plastificante con una relación de 0,83% por cada kilogramo de cementante y para 4000 PSI se utilizan dos aditivos, el primer aditivo es el mismo plastificante con una relación de 0,75% por cada kilogramo de cementante y segundo es un superplastificante con una relación de 0,46% por cada kilogramo de cementante. En general la producción de concreto está reglamentada por la NTC 3318 Producción de concreto (2000) tercera actualización, en la cual se establecen las especificaciones para el concreto producido bien sea en obra o en planta.

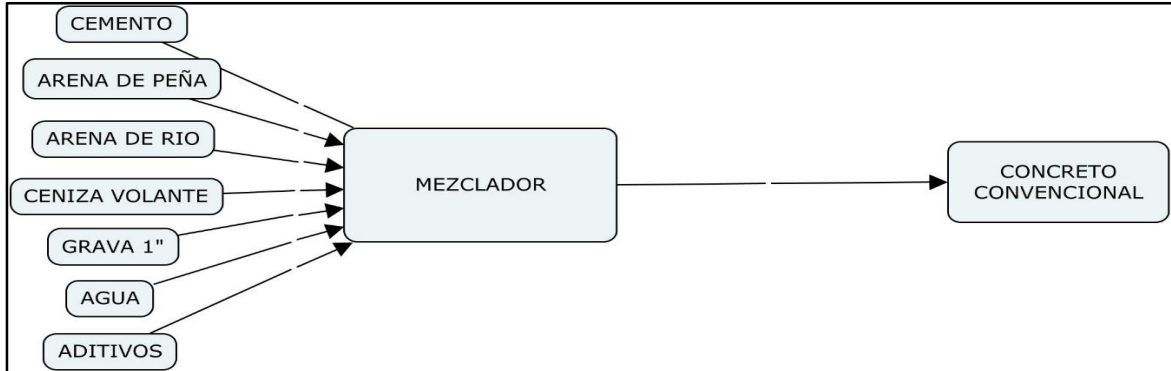
Como se sabe la producción de concreto se basa en un proceso básico de mezclado el cual se puede describir con diagrama de proceso como el descrito en la figura 5. En este proceso se requiere únicamente tolvas que transportan las materias primas y un mezclador en el que ocurre una sola reacción química conocida como hidratación del cemento, esta es una reacción álcali-agregados que tiene tres tipos de reacción, la primera es una reacción álcali-sílice en la que los hidróxidos (NaOH, KOH) atacan la superficie de los minerales silicios de los agregados, la segunda es una reacción álcali-silicatos en la cual se forma gel de silicato de sodio y una última reacción álcali-carbonatos que se produce únicamente cuando el agregado contiene arcilla. Recordemos entonces que el cemento es un conglomerante hidráulico e inorgánico, y cuando se mezcla con agua forman una pasta, la cual fragua y se endurece debido a las reacciones químicas y su proceso de hidratación.

---

<sup>14</sup> GUEVARA, Carlos. Cada día más de 2.050 llantas terminan invadiendo el espacio público. En: El tiempo. Bogotá D, C. 2, Marzo, 2015.



**Figura 5. Diagrama de proceso del concreto**

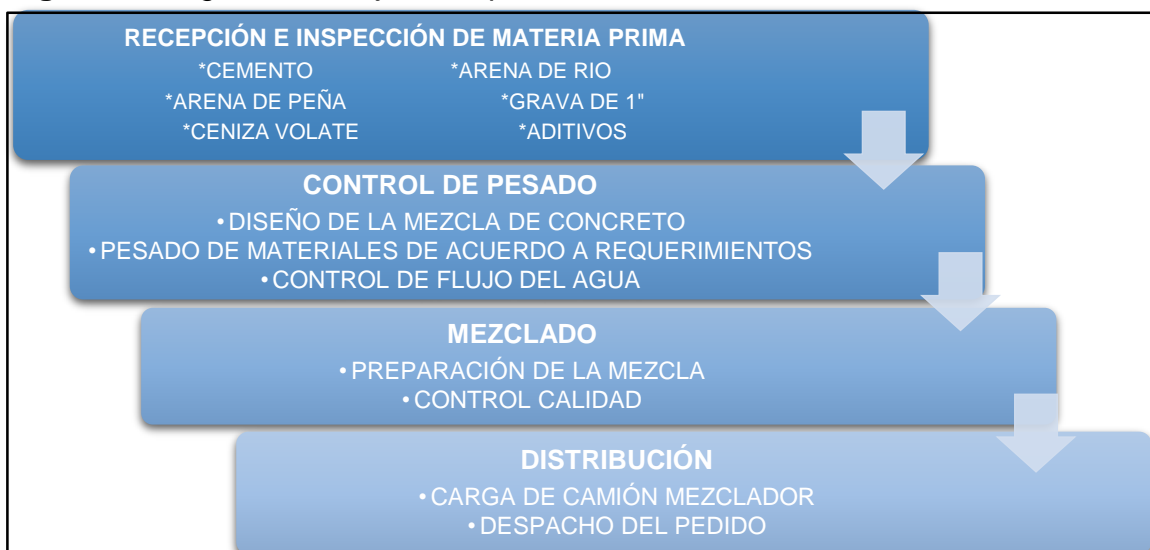


Los porcentajes y pesos de cada diseño de mezcla para el concreto varían dependiendo de las resistencias que se quieran lograr, para este diseño se deben tener en cuenta las características de los materiales como densidad y humedad, además de la granulometría y las especificaciones del cliente, sin embargo se puede tener una relación muy generalizada para elaborar el concreto la cual es:

- Una parte en volumen de agregado grueso
- Una parte de arena
- Media parte de cemento
- Agua necesaria para mantener la trabajabilidad.

Ahora bien el diagrama de proceso general para la elaboración del concreto convencional que permite comprender con mayor facilidad el proceso se presenta en la figura 6.

**Figura 6. Diagrama de flujo de la producción del concreto**



#### 4.1. PRUEBAS TÉCNICAS REALIZADAS AL CONCRETO

Con el fin de determinar las características y propiedades del concreto se deben realizar una serie de pruebas o experimentaciones en dos estados, primero en estado fresco y finalmente en estado endurecido, las correspondientes pruebas se referencian en la tabla 7

**Tabla 7. Evaluaciones para el concreto**

<b>Estado fresco</b>	<b>Estado endurecido</b>
Asentamiento	Resistencia a la compresión
Temperatura	Módulo elástico estático
Contenido de aire	Penetración a cloruros
Densidad	Permeabilidad al agua
Rendimiento volumétrico	

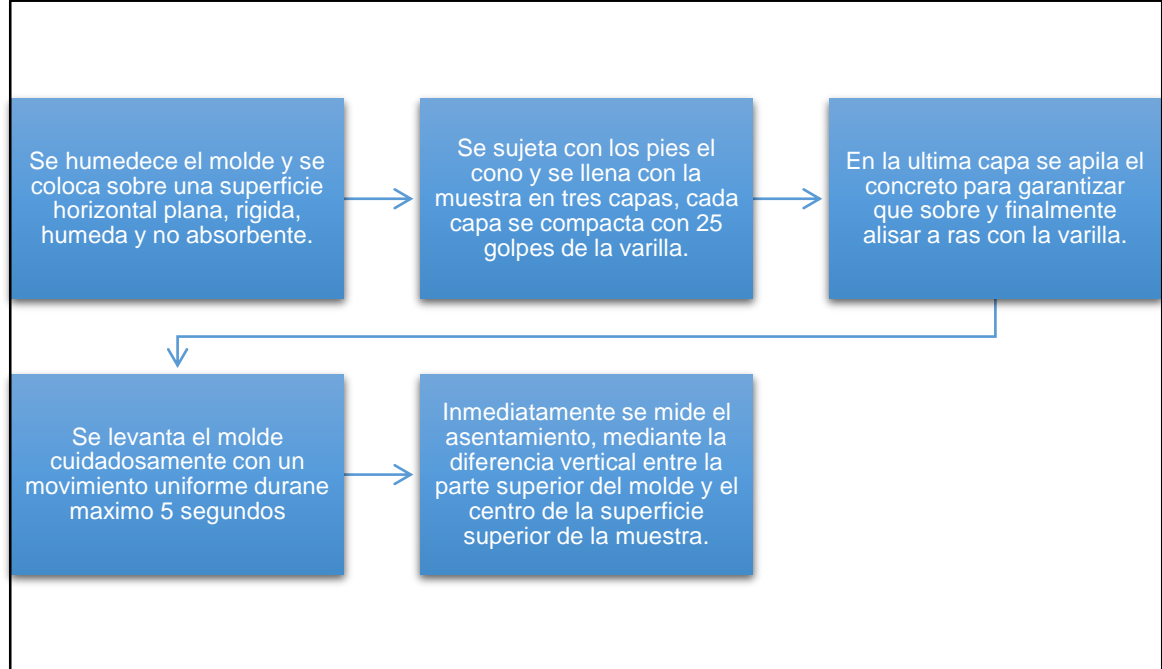
4.1.1. Asentamiento. Se refiere a la medida de la consistencia de concreto, se relaciona con el grado de fluidez de la mezcla e indica qué tan seco o fluido está el concreto<sup>15</sup>, usualmente la consistencia del concreto es una característica juzgada visualmente, sin embargo se han desarrollado pruebas como la de asentamiento que permite caracterizar esta propiedad tal como se puede observar en la figura 7. La experimentación fue regida por la NTC 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto (1992) primera actualización, en la cual se emplea el uso de un cono o molde y una varilla compactadora con las especificaciones de la norma. El proceso se puede verificar en la figura 8.

**Figura 7. Determinación del asentamiento para el concreto.**



<sup>15</sup>VALENCIA ERAZO Herwin , RAMOS ROJAS Natalia. Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo. Trabajo de grado. Ingeniería Civil e Industrial. Santiago de Cali. Pontificia Universidad Javeriana. Departamento de Ingeniarías.

**Figura 8. Diagrama de flujo medida de asentamiento NTC 396**

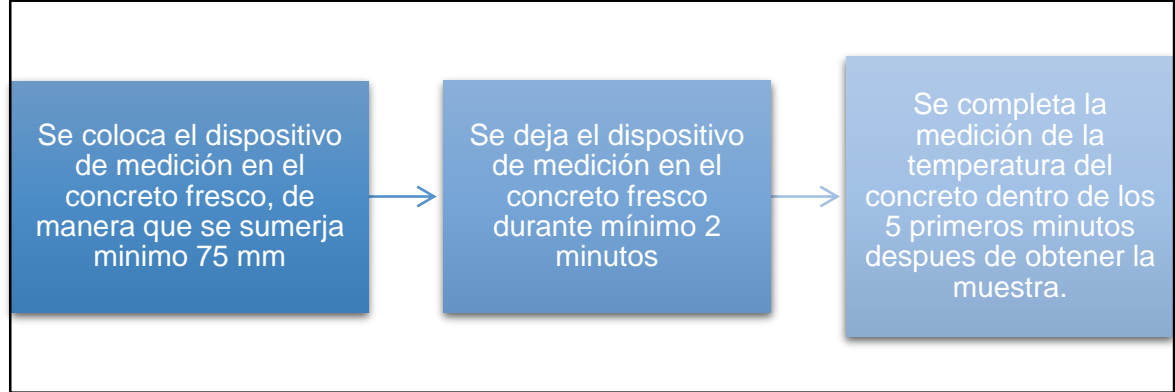


4.1.2. Temperatura. Es un parámetro fisicoquímico que permite medir el calor sensible de la mezcla fresca del concreto. La norma en la cual se basa este procedimiento es la NTC 3357 Método del ensayo para determinar la temperatura del concreto (1992) primera actualización, utilizando un termómetro bimetálico tal como se observa en la figura 9, el procedimiento se puede observar en la figura 10

**Figura 9. Determinación de la temperatura**



**Figura 10. Diagrama de flujo medida de la temperatura NTC 3557.**

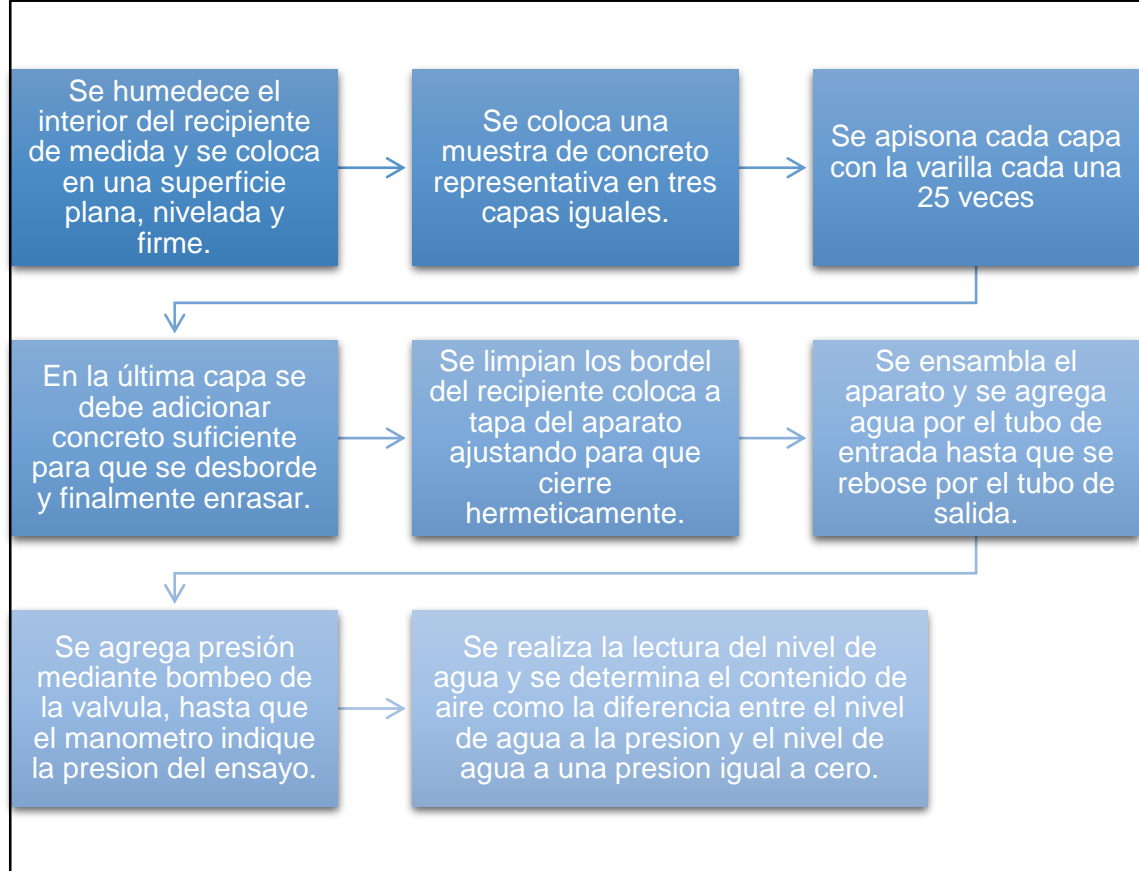


4.1.3. Contenido de aire. Este parámetro se refiere a la cantidad de aire atrapado en la mezcla fresca del concreto, que puede ser generado por efectos naturales o puede ser aire agregado a la mezcla intencionalmente por medio de agitación, para la determinación del contenido de aire se utiliza un equipo especializado, como se observa en la figura 11 y el procedimiento es realizado de acuerdo a la NTC 1032 Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. Método de presión (1994) primera actualización, el cual está descrito en la figura 12.

**Figura 11. Prueba de contenido de aire.**



**Figura 12. Diagrama de flujo determinación del contenido de aire**

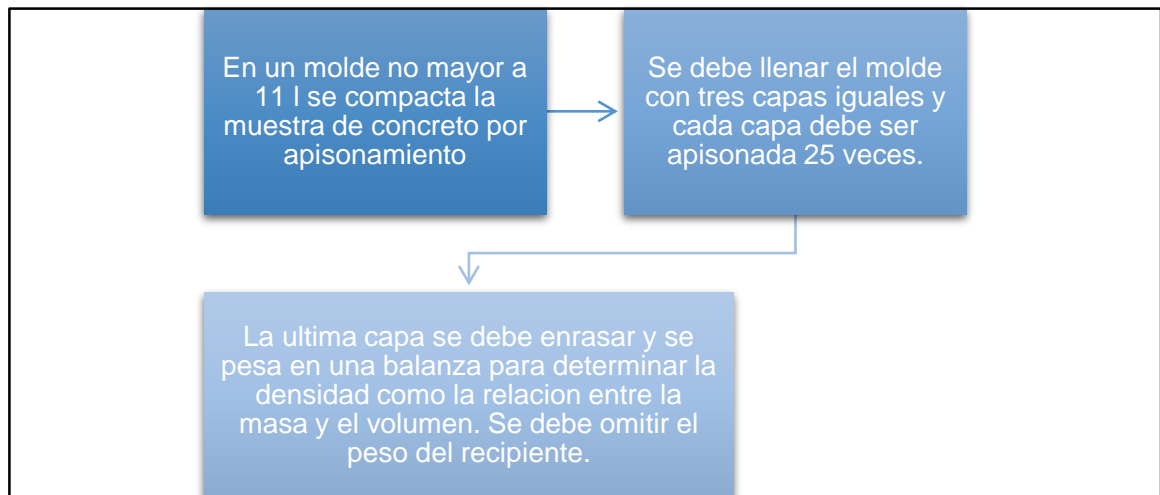


4.1.4. Densidad. La densidad es una característica que mide la relación entre el peso y el volumen ocupado por esa masa. Es medida en estado fresco del concreto. El procedimiento para el cálculo de la densidad se realiza tomando el recipiente de la prueba de contenido de aire y se pesa vacío y lleno. Luego se restan los pesos y conociendo el volumen se encuentra la relación  $m/v$ . Como se evidencia en la figura 13. La norma que preside la evaluación de la densidad es la NTC 1926 Método de ensayo para determinar la masa unitaria, rendimiento y control de aire por gravimetría del concreto (1995) primera actualización, el procedimiento se describe en la figura 14.

**Figura 13. Determinación de la densidad**



**Figura 14. Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 1926.**



4.1.5. Rendimiento volumétrico. Es el volumen real de concreto que se puede producir con cantidades determinadas de las materias primas, este parámetro permite calcular el contenido de cemento y se puede calcular por medio de las bases descritas en la NTC 1926 Método de ensayo para determinar la masa unitaria, rendimiento y control de aire por gravimetría del concreto (1995) primera actualización. Para este procedimiento se utiliza la ecuación 2.

## Ecuación 2. Ecuación de rendimiento volumétrico

$$y = \frac{M_i}{M}$$

Donde:

Mi: es la masa determinada por el diseño de mezcla

M: es la masa real del concreto

Por otra parte el concreto se especifica por medio de las propiedades inherentes a su durabilidad la cual es evaluada en el estado endurecido, el concreto alcanza su edad madura con un tiempo de curado de 28 días, sin embargo el estado endurecido puede empezar en las primeras horas luego de ser fundida la mezcla, las pruebas de resistencia se realizan a diferentes edades, 1, 3 y 7 días, para lograr tener un seguimiento y corroborar que la resistencia aumente correctamente a medida que el concreto se acerca a su edad madura. Adicionalmente la durabilidad del concreto se puede caracterizar por medio del módulo elástico estático, la penetración de cloruros y la permeabilidad al agua, las cuales se evalúan a 28 días, es decir a la edad madura, a continuación se encuentran dichas evaluaciones.

### 4.1.6. Resistencia

La resistencia se puede medir por medio de dos parámetros, los cuales son:

4.1.6.1. Compresión 1, 3, 7, 28 días: Es la característica mecánica principal del concreto, se puede definir como la máxima resistencia medida de una muestra de concreto a la carga axial, como se observa en la figura 15, generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ) y se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la muestra durante el ensayo entre el área de la sección transversal promedio,<sup>16</sup> como lo describe la NTC 673 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (2010) tercera edición, en la figura 16 se encuentra el procedimiento.

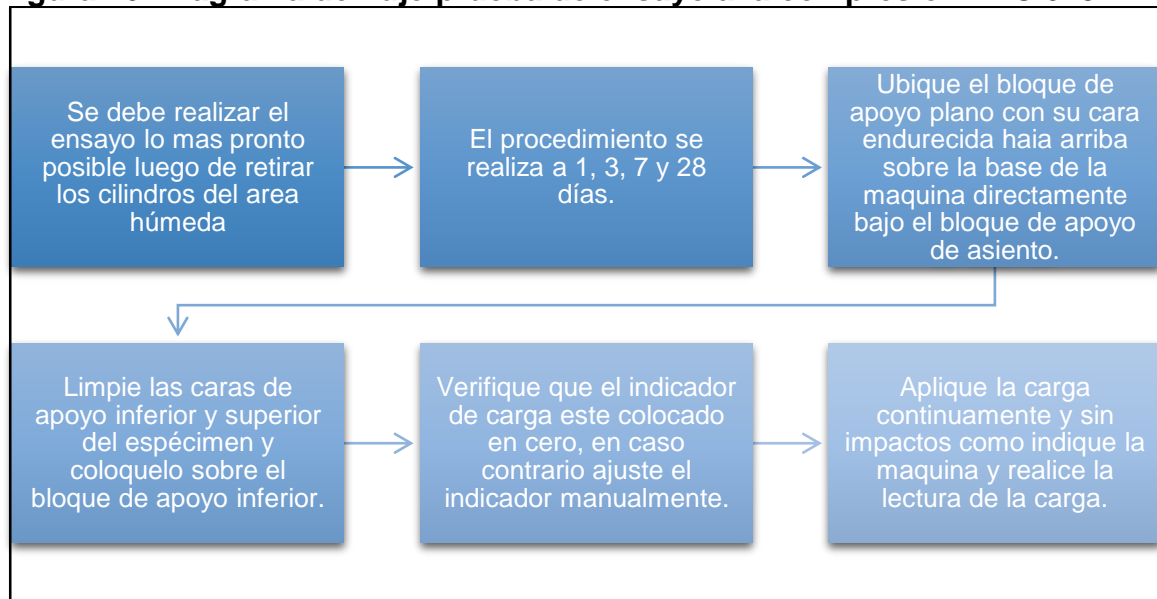
---

<sup>16</sup>TORRES OSPINA, Op., Cit., p 80.

**Figura 15. Prueba de resistencia a la compresión**



**Figura 16. Diagrama de flujo prueba de ensayo a la compresión NTC 673**



4.1.6.2. Módulo elástico estático 28 días: Es también conocido como resistencia a la flexión esta propiedad se mide con el ensayo de vigas simples con carga en los tercios medios, los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura y variaran si existen diferencias en el tamaño del espécimen, su preparación, condiciones de humedad, curado, o si la viga ha sido fundida o cortada al tamaño requerido,<sup>17</sup> tal como lo indica la NTC 4025 Método de ensayo

<sup>17</sup>TORRES OSPINA, Op., Cit., p 77.

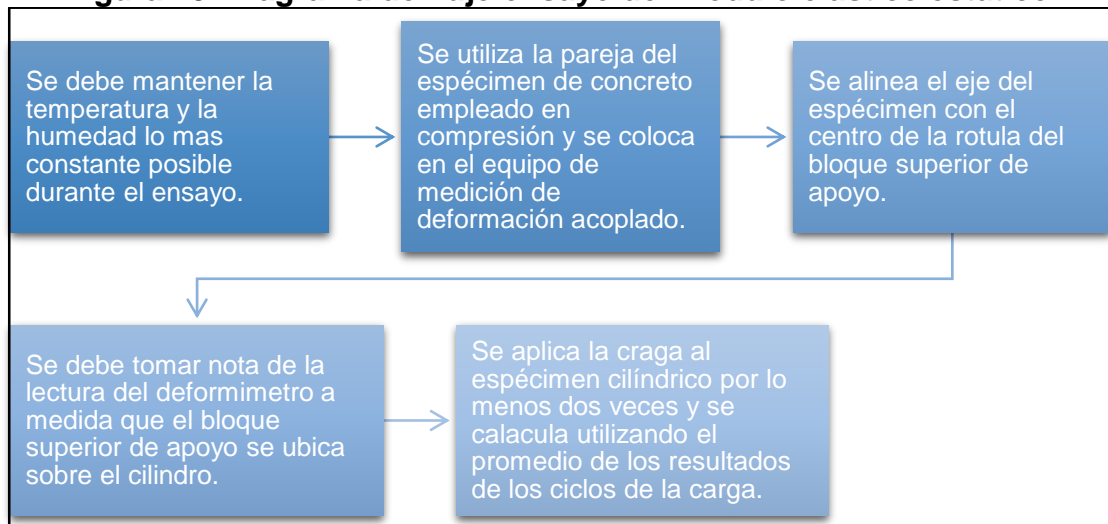


para determinar el módulo elástico estático y la relación de poisson en concreto a presión (2006) primera actualización. El equipo utilizado es el mismo de compresión con la diferencia que se debe agregar el montaje de la figura 17 y el procedimiento del ensayo descrito por la norma se puede verificar en la figura 18.

**Figura 17. Montaje prueba de módulo elástico estático**



**Figura 18. Diagrama de flujo ensayo del módulo elástico estático**



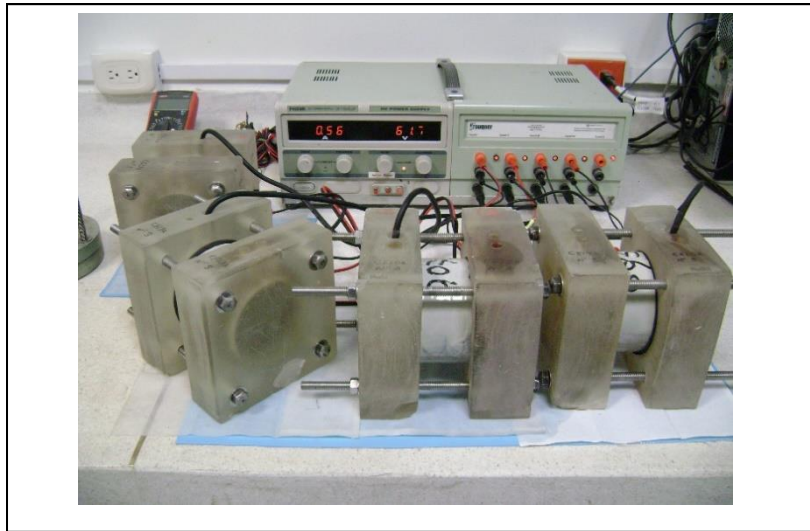
4.1.7. Durabilidad 28 días. Esta es otra de las características más importantes del concreto y determina el tiempo de vida del concreto y se relaciona con las condiciones de exposición al medio ambiente, el cual puede generar deterioro por causas físicas, químicas o mecánicas.<sup>18</sup> La durabilidad se puede medir por medio de los siguientes parámetros:

<sup>19</sup> TORRES OSPINA, Op., Cit., p 79.

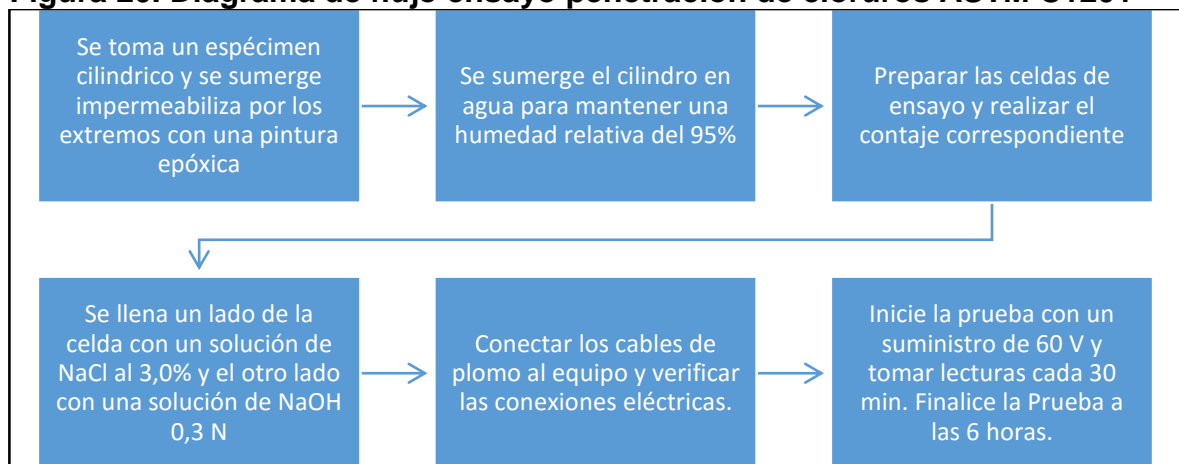
<sup>20</sup> TORRES OSPINA, Op., Cit. P 82

4.1.7.1. Penetración de cloruros: Este parámetro va enfocado a la protección de los aceros que refuerzan las estructuras de concreto, ya que los cloruros con el principal problema de corrosión y por esto el concreto debe brindar una protección física y química al acero. Este problema se encuentra directamente relacionada con el tipo de cemento, la relación a/c, la compactación y el curado de la mezcla entre otros.<sup>19</sup> El procedimiento se rige por la ASTM C1201 Indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir iones de cloruro (2012), en la figura 19 se puede observar montaje para el ensayo y el procediendo se describe en la figura 20.

**Figura 19. Montaje ensayo de penetración de cloruros**



**Figura 20. Diagrama de flujo ensayo penetración de cloruros ASTM C1201**



4.1.7.2. Permeabilidad al agua: es la capacidad del concreto de permitir el paso de agua a través de su estructura interna sin causarle daños, este parámetro depende de la porosidad de la pasta de cemento y de la porosidad de los agregados. Adicionalmente la penetración de agua puede disminuir en concretos con relación de a/c bajas y con grados altos de hidratación del cemento, ya que los poros se reducen y por tanto la permeabilidad disminuye.<sup>20</sup> La NTC que preside el desarrollo de esta evaluación es la 4483 Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua (1998) primera actualización, el equipo empleado en el ensayo se puede observar en la figura 21 y el procedimiento se puede verificar en la figura 22.

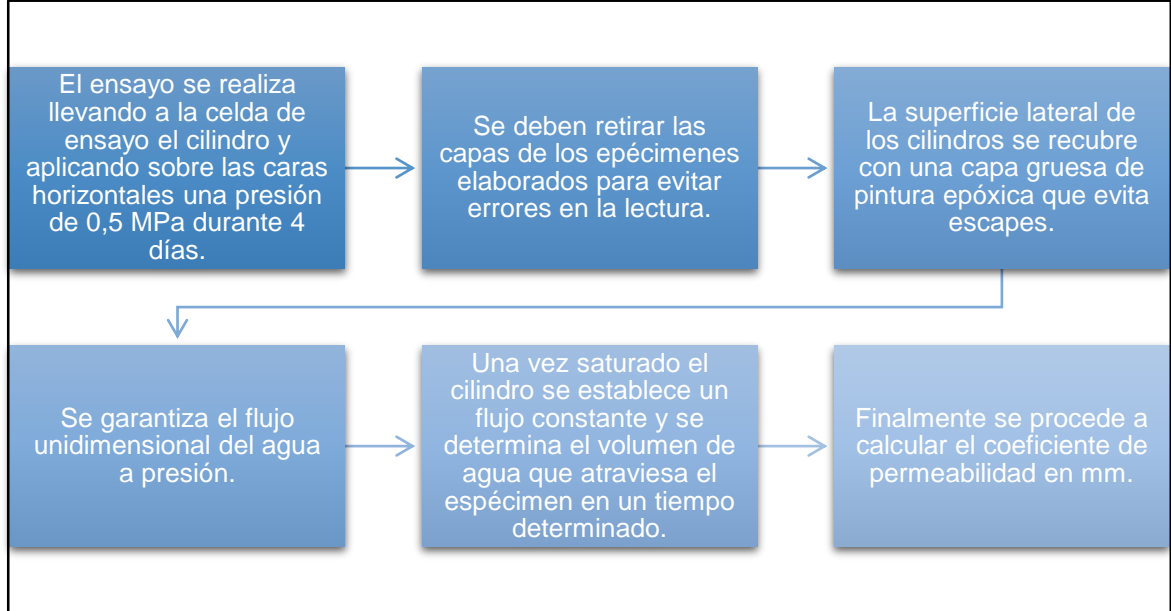
**Figura 21. Ensayo permeabilidad del concreto al agua**



---

<sup>21</sup> TORRES OSPINA, Op., Cit., p 85

**Figura 22. Diagrama de flujo ensayo de permeabilidad al agua NTC 448**



## 5. DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se encuentran los resultados de los ensayos que se realizaron al concreto para evaluar cada una de sus propiedades. El diseño de las mezclas se determinó de la siguiente manera, teniendo en cuenta que se desea realizar dos pruebas de resistencia, con base en el volumen, de 3.000 y 4.000 PSI ya que son las dos resistencias comercialmente más utilizadas. Las muestras fueron elaboradas de acuerdo a la NTC 550 Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra (2000) segunda actualización.

De acuerdo a investigaciones y experimentaciones anteriores de diversos autores reportados en trabajos de grado y tesis, los porcentajes de reemplazo de grano de caucho de llanta reciclada deben ser de máximo 10%, tal como se concluye en el trabajo de grado titulado “Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumático triturado como reemplazo del 10% y del 30% del volumen del agregado fino para un concreto con fines de uso estructural” la resistencia con porcentajes de reemplazo del 10 % alcanza los niveles requeridos mientras que el concreto con reemplazo del 30% no alcanza a 28 días la resistencia necesaria<sup>21</sup>, esto se debe a que el concreto modificado con este GCR pierde muy fácilmente la resistencia a la compresión. Sin embargo se ha decidido estudiar las propiedades del concreto hasta un reemplazo del 20% para verificar la caída de sus propiedades más importantes de resistencia y durabilidad, los porcentajes seleccionados son:

Para Grano Fino: 0%, 5%, 10%, 15% y 20%

Para Grano Grueso: 0%, 5%, 10%, 15% y 20%

Cada uno de los ensayos descritos en el anterior capítulo se realizó a todas las muestras elaboradas en el laboratorio siguiendo las respectivas normas técnicas colombianas con el fin de garantizar el debido seguimiento de los procedimientos y tener confiabilidad en los resultados obtenidos al finalizar la experimentación. En total son nueve (9) evaluaciones, las cinco (5) primeras realizadas en estado fresco y las cuatro (4) restantes se realizan en estado endurecido.

### 5.1. ESTADO FRESCO

Las evaluaciones realizadas en estado fresco permiten observar el comportamiento de la mezcla de concreto en los primeros minutos justo después de su elaboración, de esta manera es posible evaluar si las mezclas han sido preparadas correctamente y si están presentando resultados equivalentes a los

---

<sup>21</sup> PEÑALOZA GARZÓN, Cristian Román. Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen de agregado fino para un concreto con fines de uso estructural. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingenierías. 2015.,p\_\_\_\_.

descritos en las normas. Comercialmente estos parámetros no son determinantes, por esta razón se tienen en cuenta mas no serán evaluados en el análisis gráfico y tampoco en el diseño experimental. Aun así para evaluar el comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada es importante realizar estas pruebas que hacen parte de la caracterización del material y por esta razón se incluyen para observar el comportamiento del concreto modificado con GCR y sus cambios respecto al concreto convencional. Los resultados de los ensayos de asentamiento, temperatura, densidad, contenido de aire y rendimiento volumétrico se evidencian las tablas 8, 9, 11 y 12 donde se reporta la información del tipo de grano utilizado, el tipo de resistencia y el porcentaje de reemplazo de GCR.

5.1.1. Asentamiento. El asentamiento es una medida que se especifica de acuerdo a la experiencia y a la necesidad del cliente, por ejemplo para una mezcla de concreto que se desea utilizar para elaboración de vigas se recomienda un asentamiento de 9 pulgadas. En la industria cada empresa tiene sus propios códigos y recomendaciones en cuanto a la medida del asentamiento, cabe recordar que el asentamiento es una medida de la manejabilidad o fluidez del concreto, a menor asentamiento mayor fluidez del concreto y se puede modificar con una adición de agua a la mezcla, es decir que el asentamiento puede ser ajustado. Partiendo de este criterio se puede observar en la tabla 8 que el asentamiento en general se encuentra dentro de los rangos aceptables, es decir, se podría utilizar en cualquier aplicación, y se puede acomodar a las necesidades o exigencias de un cliente. En comparación con los resultados publicados en el artículo titulado “Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres” donde emplean el termino manejabilidad, los resultados obtenidos son análogos, es decir, realizan ensayos con dos tipos de grano a diferentes porcentajes y reportan que se presenta una disminución de la medida del asentamiento con respecto al aumento del porcentaje de GCR<sup>22</sup>.

**Tabla 8. Resultados Asentamiento**

		ASENTAMIENTO (in)									
		3000 PSI					4000 PSI				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGADO FINO	PRIMERA TANDA	7,25	7	6,5	3,5	3	6,5	8	8	9,5	4
	SEGUNDA TANDA	7	7	6,25	3,75	2	7	7	6,5	3	2
AGREGADO GRUESO	PRIMERA TANDA	6,25	5,25	6,5	6	4	8	7	7,5	4,5	4,5
	SEGUNDA TANDA	7	6,75	6	5,75	4,5	7	7,5	6,5	6,5	6,25

<sup>22</sup>MAVROULIDOU M., FIGUEIREDO J. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres. En: GlobalNEST. Septiembre, 2010, vol12 no. 4, p. 359-367..

5.1.2. Densidad o peso unitario. En cuanto la densidad o peso unitario, la norma es clara a la hora de realizar una clasificación de los concretos, en la cual se especifican concretos livianos, concretos normales y concretos pesados, esta clasificación se puede observar en la tabla 9. El rango en el que se encuentran las mezclas desarrolladas en la experimentación es el rango de los concretos normales.

**Tabla 9.** Clasificación del concreto, según su peso unitario<sup>23</sup>

Peso unitario aproximado Kg/m <sup>3</sup>	Descripción
500 – 2.000	Concreto ligero
2.100 – 2.500	Concreto normal
2.600 – 5.600	Concreto pesado

En la tabla 10 se pueden verificar los resultados y se puede observar el comportamiento del concreto a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo, el concreto tiene una tendencia a disminuir su densidad en 134 Kg/m<sup>3</sup>, aproximadamente 6%, sin embargo esta disminución no es importante, es decir, no cambia de rango, a pesar de ser un poco menor su densidad, sigue comportándose como un concreto normal. Estos resultados son comparables con los obtenidos en el artículo ya mencionado anteriormente donde también se observó una disminución de aproximadamente 500 Kg/m<sup>3</sup>, es decir, alrededor de 21% en la densidad o peso unitario del concreto con reemplazos hasta el 40%. Se podría concluir que el efecto que tiene el GCR en el concreto se debe a que la arena tiene una densidad mayor que el GCR (2,4 y 1,6 Kg/m<sup>3</sup> frente a 0,86 y 0,81 Kg/m<sup>3</sup>).

**Tabla 10. Resultado Densidad**

		DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )									
		3000 PSI					4000 PSI				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGADO FINO	PRIMERA TANDA	2321	2286	2278	2242	2213	2344	2316	2270	2225	2205
	SEGUNDA TANDA	2347	2299	2285	2242	2228	2384	2350	2333	2276	2254
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGADO GRUESO	PRIMERA TANDA	2338	2316	2302	2245	2217	2380	2362	2330	2281	2259
	SEGUNDA TANDA	2347	2299	2296	2254	2246	2375	2360	2321	2274	2241
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%

<sup>23</sup> PEÑALOZA GARZÓN, Op., Cit., p 45.

5.1.3. Contenido de Aire. Para el análisis del contenido de aire se debe tener presente las especificaciones de la NTC 3318, en la cual se presenta la tabla 11 que permite conocer la tolerancia máxima de contenido de aire en el concreto de acuerdo al tamaño máximo de partícula empleado.

**Tabla 11. Contenido total incorporado recomendado para concreto NTC 3318**

Condiciones de exposición	Contenido total de aire % en volumen						
	Tamaño máximo del agregado en mm						
	9,5	12,5	19,0	25,0	37,5	50,0	75,0
Suave	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5
Moderado	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5
Severo	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5

Esta medida indica o se relaciona con la cantidad de poros que puede tener el concreto, en general desde el punto de vista técnico lo ideal es que los porcentajes de contenido de aire sean relativamente bajas, pues a medida que aumenta el contenido de aire aumenta la posibilidad de fracturas en el concreto. Los resultados de la experimentación se encuentran en la tabla 12.

**Tabla 12. Resultados Contenido de Aire**

		CONTENIDO DE AIRE (% en Volumen)									
		3000 PSI					4000 PSI				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGADO FINO	PRIMERA TANDA	1,6	2,1	2,2	2,9	3,2	1,9	2	2,3	2,4	4,5
	SEGUNDA TANDA	1,9	2,2	2,5	3,5	3	1,7	1,8	2,8	2,8	2,5
AGREGADO GRUESO	PRIMERA TANDA	1,5	1,6	1,6	1,7	1,9	1,5	1,7	1,9	2,5	2,7
	SEGUNDA TANDA	1,7	1,6	1,6	1,9	1,9	1,6	1,9	2	2,2	2,6

Al realizar la respectiva comparación entre la tabla 11 y la tabla 12 de resultados, tomando como referencia el valor máximo de contenido de aire, el cual es 4,5% y teniendo presente que el tamaño máximo de partícula de agregado es de una pulgada, es decir, aproximadamente 25 mm, se logra concluir que los porcentajes de contenido de aire son moderadas. Para efectos de las muestras realizadas en la experimentación se puede concluir que el concreto se encuentra en un rango de condiciones de exposición moderadas, es decir tiene porcentajes moderados de contenido de aire, además indican en buena medida que el concreto modificado con GCR no presenta problemas por altos índices de contenido de aire. Sin embargo los resultados evidencian un aumento en el contenido de aire, este se debe a que la pasta cementante no logra reaccionar con el caucho como si lo hace con los agregados tradicionales lo que genera una menor adhesión, adicionalmente es posible comparar el caucho con pequeñas unidades de aire que



se pueden comprimir, es decir en la zona donde hay caucho se puede realizar una leve compresión y puede generar mayores vacíos, por los cuales las grietas se logran difundir.

5.1.4. Rendimiento Volumétrico. El parámetro de rendimiento volumétrico es una medida que permite determinar si el volumen de concreto al final del proceso es realmente el volumen que se determinó en el diseño inicial, esto es importante para la industria puesto que permite saber si se está entregando por ejemplo un metro cubico real de producto y no menos ni más, por supuesto porque esto se traduce en costos o para la empresa o para el cliente. Es decir cuando el rendimiento volumétrico del concreto es uno (1) o muy cercano a uno (1) se dice que se está cumpliendo con la relación del volumen del diseño y del volumen entregado al cliente, tal como se puede observar en la tabla 13.

**Tabla 13. Resultados Rendimiento Volumétrico**

		3000 psi					4000 psi				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
	Primera tanda	1,01	1,02	1,01	1,01	1,01	1,05	1,04	1,05	1,05	1,06
Agregado fino	Segunda tanda	1	1	1	1	1	1	1,01	1	1,01	1,01
	Primera tanda	1,01	1,01	1	1,01	1,01	1	1,01	1,02	1,01	1,01
Agregado grueso	Segunda tanda	1	1,01	1	1,02	1,03	1,01	1,02	1,01	1,03	1,01

Es evidente en cada una de las pruebas realizadas al concreto en estado fresco que el reemplazo de la arena por GCR tiene efectos sobre los resultados, esto se puede justificar por la naturaleza de los dos materiales utilizados como agregados, la arena y el GCR difieren desde su composición química, su densidad, la manera en la que reaccionan con la pasta cementante hasta en su rigidez y tamaño de partícula. De las propiedades del concreto en estado fresco, se encuentran pocos reportes, únicamente se habla de asentamiento y densidad en algunos artículos, pues los trabajos están enfocados a evaluar las condiciones de resistencia, la cual se discutirá más adelante, sin embargo algunos autores como el que publico el trabajo de grado titulado “Estudio del comportamiento mecánico del concreto sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo” permite verificar que el asentamiento disminuye con la adición del GCR<sup>24</sup>. Dicho esto, como se puede analizar en cada uno de los ensayos los resultados son claros y se puede concluir que las propiedades del concreto si se ven afectadas por la composición del GCR, su efecto tiende a ser negativo, es decir disminuye las propiedades, sin embargo no sobrepasan los límites establecidos, permitiendo que el concreto pueda seguir siendo útil.

<sup>24</sup> VALENCIA ERAZO, Op., Cit., p 68.

## 5.2. ESTADO ENDURECIDO

Ahora bien, en relación a las últimas cuatro (4) propiedades, evaluadas en estado endurecido, las cuales son resistencia a la compresión, módulo elástico estático, penetración de cloruros y permeabilidad al agua, se tendrá en cuenta únicamente la resistencia para el diseño experimental, debido a que la resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto<sup>25</sup>, la cual se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm<sup>2</sup>, MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (PSI). Aun así, respecto a las demás propiedades, módulo elástico estático, permeabilidad al agua y penetración al cloruro se desarrollaran las evaluaciones con el fin de darle una mejor caracterización a este concreto con GCR, se realizara solamente un análisis y se tendrán en cuenta para analizar el efecto que ejerce la introducción del grano de caucho de llanta triturada al concreto convencional debido a que estos parámetros a pesar de ser relevantes e importantes, no son los más requeridos comercialmente, puesto que el concreto se comercializa por su capacidad de resistencia bien sea alta o baja.

Los resultados de las evaluaciones de módulo elástico estático y durabilidad en términos de penetración de cloruros y permeabilidad al agua se encuentran consignadas en las tablas 14, 15 y 16 respectivamente. Para estas evaluaciones solo se realizó una tanda y se evaluó únicamente a 28 días, es decir a la edad madura de curado. En seguida se encuentran las gráficas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 donde se ve el comportamiento de cada una de las propiedades respecto al porcentaje de reemplazo, el tipo de GCR y el diseño de resistencia elaborado.

5.2.1. Módulo elástico estático. En cuanto al módulo elástico estático es clave resaltar que es una de las propiedades más importantes especialmente cuando el concreto se está utilizando para estructuras puesto que es la medida de la rigidez de este material frente a una carga impuesta sobre el concreto e influye en las deflexiones del mismo, esto nos indica que lo ideal es buscar un módulo elástico estático alto en el concreto diseñado, sin embargo como se puede observar en la tabla 14 para un concreto modificado con GCR esta propiedad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de grano de caucho de llanta triturada. Es posible afirmar que la disminución del módulo elástico se debe a la diferencia en la dureza de los agregados, el grano de caucho de llanta reciclada tiene poca dureza, es decir se puede comprimir fácilmente, mientras que la arena no se puede comprimir, adicionalmente por la poca adhesión que tiene el caucho a la pasta cementante se comportan dentro de la mezcla como dos elementos independientes.

---

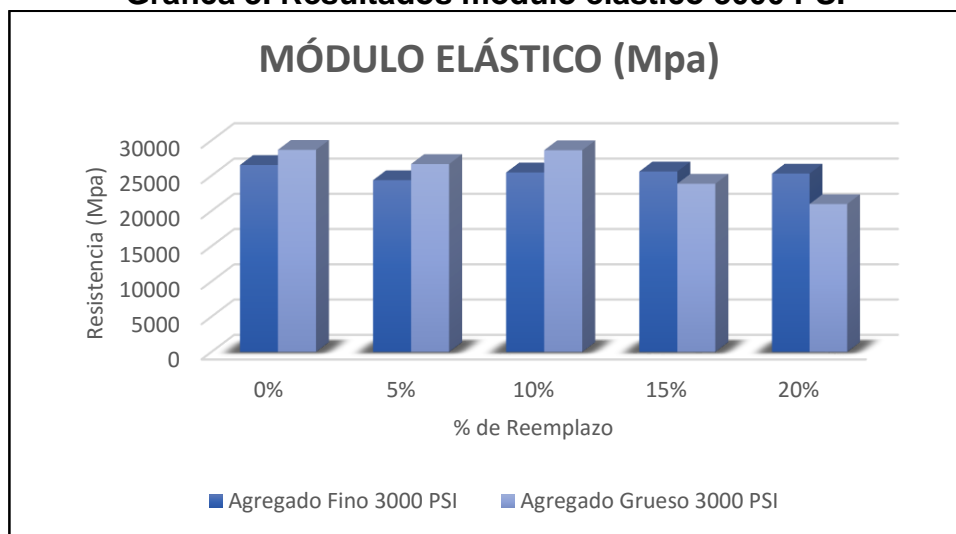
<sup>25</sup> OSORIO, Jesús David. Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión Bogotá: Blog 360° en concreto.

**Tabla 14. Resultados Módulo Elástico**

		3000 PSI					4000 PSI				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGAD O FINO	PRIMER A TANDA	2651 5	2436 3	2546 3	2559 3	2529 8	3288 0	3128 0	2792 8	2605 2	2038 1
AGREGAD O GRUESO	PRIMER A TANDA	2867 2	2665 9	2861 6	2385 7	2097 1	3364 0	3026 5	2965 2	2745 6	2158 9

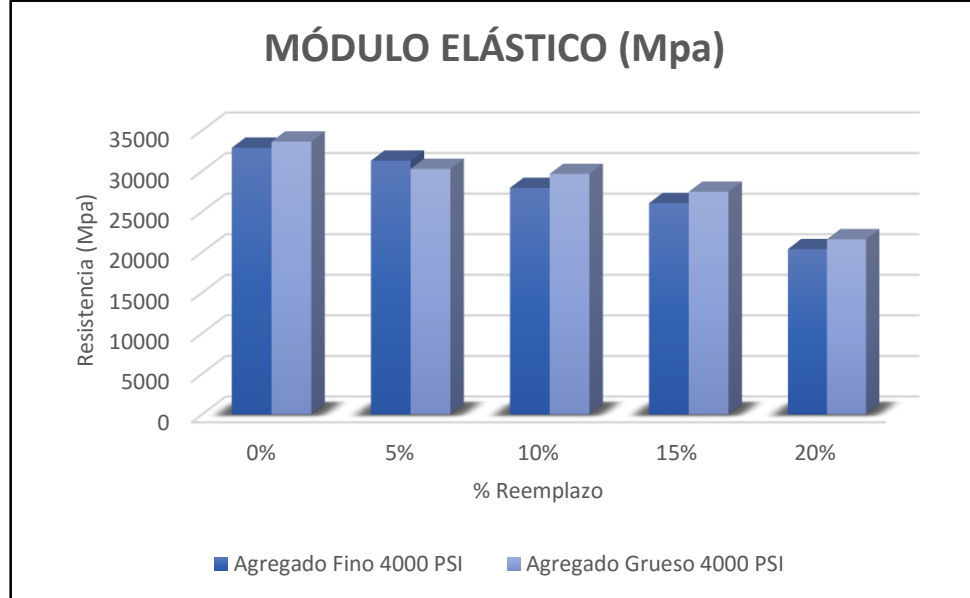
El comportamiento de disminución no tiene una tendencia marcada que diferencie entre un tipo de grano y otro, esto se puede observar en las gráficas 3 y 4 para el concreto de resistencia de 3000 PSI y el de 4000 PSI respectivamente. Sin embargo es claro que el GCR tiene un efecto sobre el comportamiento del módulo elástico estático del concreto, esto no solo se evidencia en los resultados de esta experimentación donde se obtuvo una caída del módulo elástico en el concreto de 3000 PSI con grano fino aproximadamente del 5%, mientras que para el agregado grueso la caída es del 27% aproximadamente y en el concreto de 4000 PSI con grano fino la disminución representa un 38% mientras que la caída para el mismo concreto con agregado grueso es del 35%. También se hace evidente en otras investigaciones como la ya mencionada anteriormente en la cual evalúan el comportamiento del concreto con reemplazos del 10% y 30% donde indica en sus resultados que se presenta una disminución de esta propiedad del 12%<sup>26</sup>.

**Gráfica 3. Resultados módulo elástico 3000 PSI**



<sup>26</sup> PEÑALOZA GARZÓN, Op., Cit., p\_\_.

**Gráfica 4. Resultados módulo elástico 4000 PSI**



5.2.2. Penetración de cloruros. La penetración de cloruros es un parámetro que implica la protección de los materiales metálicos que se introducen en el concreto a modo de refuerzo. La corrosión del acero de refuerzo que se genera dentro del concreto es causada por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad alrededor de las barras, pero la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso, por ejemplo el agua de mar por su naturaleza contiene una alta cantidad de iones cloruros disueltos, los cuales son un elemento ofensivo para las estructuras de concreto puesto que acelera el proceso de corrosión.

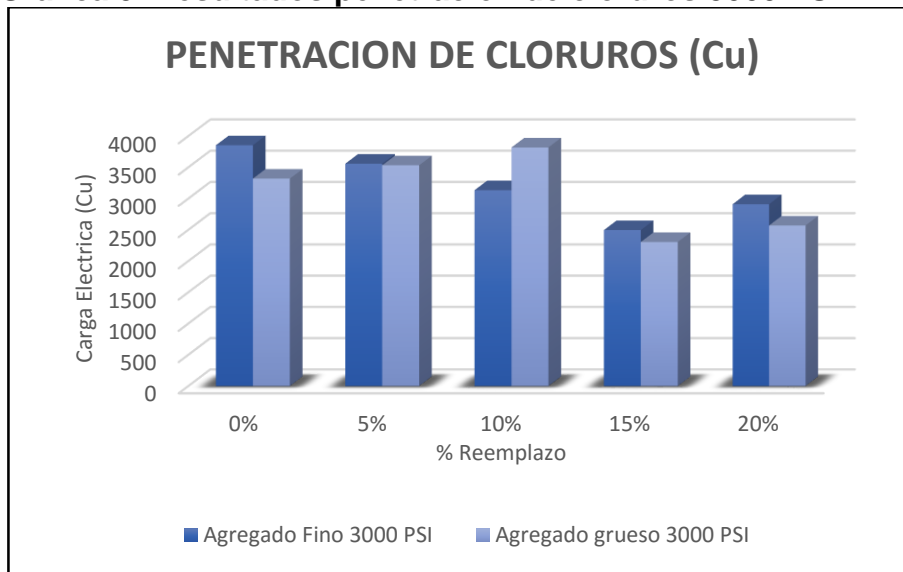
De acuerdo a la norma ASTM C1202 existe una clasificación para el concreto que permite identificar que tan permeable es el concreto, así como lo explica la norma el ensayo busca hacer pasar corriente a través de los cilindros de concreto que están rodeados de un solución conductora con iones cloruros disueltos. El equipo mide una cantidad de carga que pasa a través de las muestras y de esta manera arroja el resultado en coulombs. Para las muestras de concreto modificado con GCR se tiene un rango de permeabilidad entre 3854 Coulombs y 1551 Coulombs tal como se puede verificar en la tabla 15.

**Tabla 15. Resultados Penetración de Cloruros**

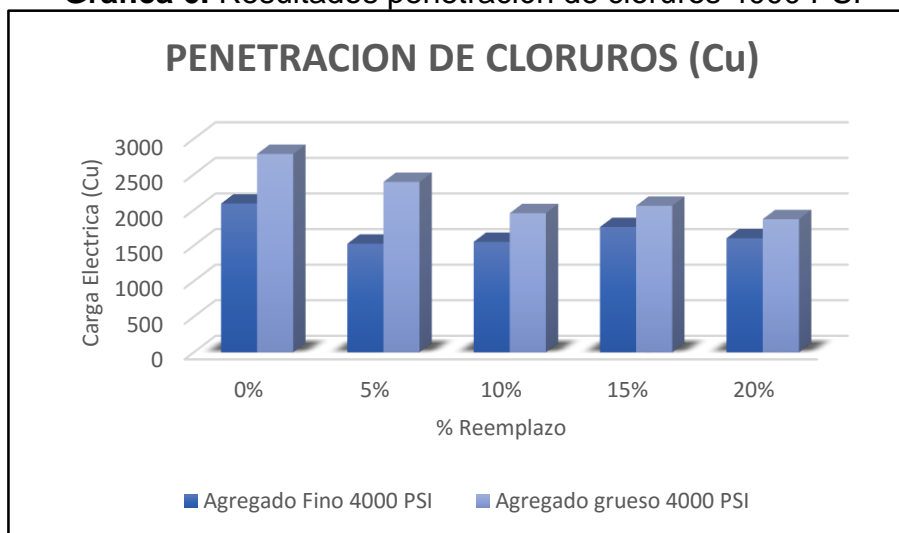
		3000 psi					4000 psi				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
Agregado fino	Primera tanda	3854	3559	3135,5	2496,5	2910,5	2089	1525	1551	1760	1601
Agregado grueso	Primera tanda	3320	3533	3819	2306	2570	2786	2393	1954	2058	1869

En las gráficas 5 y 6 se hace evidente la caída de la penetración del ion cloruro en el concreto, a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de CGR, sin embargo para esta propiedad la disminución no implica un factor negativo, por el contrario como se explica a continuación es un factor positivo para las estructuras de concreto reforzado con materiales metálicos resistentes.

**Gráfica 5. Resultados penetración de cloruros 3000 PSI**



**Gráfica 6. Resultados penetración de cloruros 4000 PSI**



Si se realiza la comparación con la norma, específicamente con la clasificación que es posible apreciar en la tabla 16 la penetración de cloruros del concreto se encuentra en dos posibles rangos, uno moderado y otro bajo. Ahora bien si analizamos que los datos iniciales de penetración se encuentran en el rango moderado y que pasan a un rango bajo, se puede deducir que en cuanto a este parámetro el efecto del concreto es positivo pues disminuye la penetración de cloruros, haciendo que las estructuras se encuentren mejor protegidas a la corrosión.

**Tabla 16. Permeabilidad del ion cloruro en el concreto**

Carga Pasada (coulombs)	Permeabilidad al Ion Cloruro
> 4,000	Alta
2,000 – 4,000	Moderada
1,000 – 2,000	Baja
100 – 1,000	Muy Baja
< 100	Despreciable

5.2.3. Permeabilidad al agua. Ahora bien, la permeabilidad al agua es una característica que permite darle un valor agregado al concreto, pues al tener una cierta medida de permeabilidad se convierte en un producto útil para ser usado en zonas donde se requiere hacer una colección de las aguas lluvia, es decir tiene importantes aplicaciones en escenarios como parqueaderos y senderos peatonales que presentan un tránsito liviano. Esta propiedad permite la filtración del agua al subsuelo, reduciendo el escurrimiento superficial, evitando la contaminación, el encharcamiento y la erosión de áreas aledañas. Por su parte el

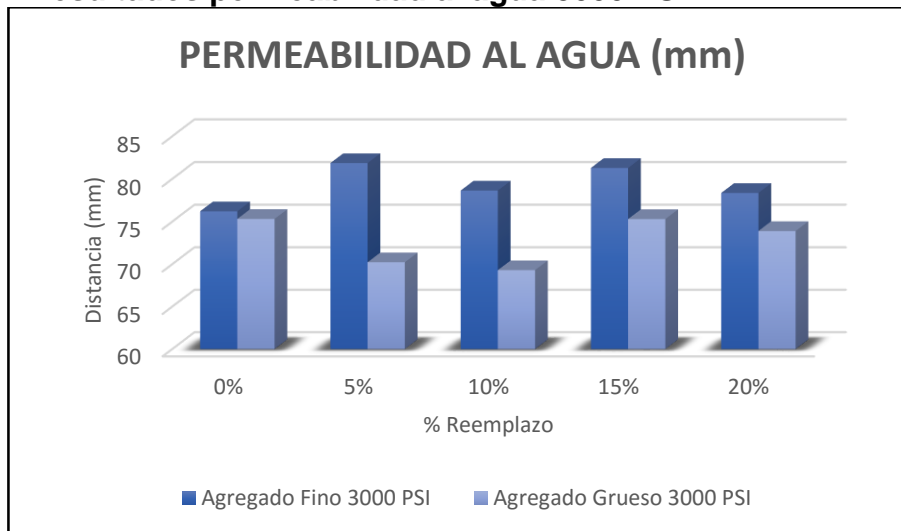
resultado que reporta es una medida de que tanta profundidad logro alcanzar el agua dentro del cilindro muestra, bajo el respectivo procedimiento de la norma.

En la tabla 16 se encuentran los datos de permeabilidad del agua de los cuales es posible obtener un rango entre una permeabilidad desde 46 mm hasta 81,29 mm, de igual manera se puede realizar una comparación de la información a bajos porcentajes de reemplazo hasta llegar al porcentaje máximo de reemplazo realizado en esta experimentación, sin embargo aunque para este parámetro no se encuentra un comportamiento marcado, se puede decir que si existe una variabilidad que tiende al aumento en el concreto de 3000 PSI mientras que se evidencia una disminución en el de 4000 PSI. Esto también se observa en las gráficas 7 y 8.

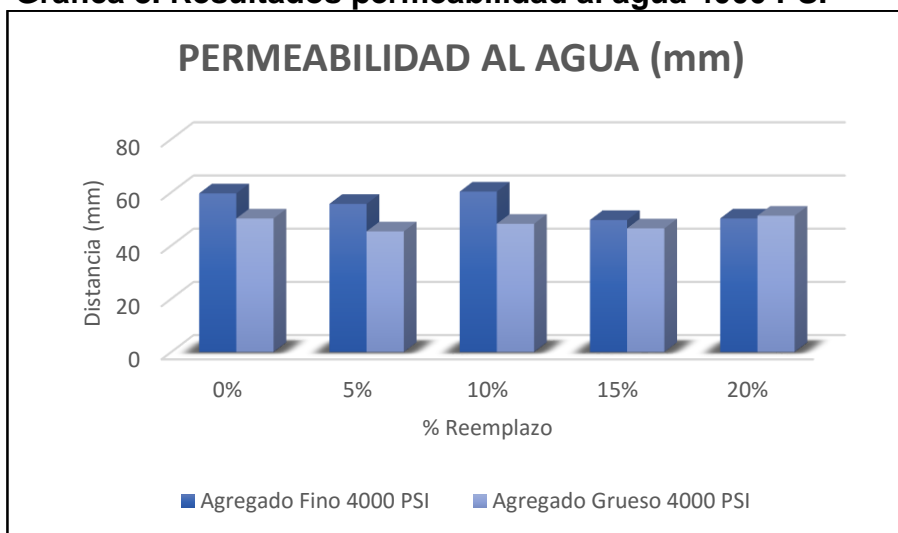
**Tabla 17. Resultados Permeabilidad al agua**

		PERMEABILIDAD AL AGUA (mm)									
		3000 PSI					4000 PSI				
		0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGAD O FINO	PRIMER A TANDA		81,8	78,6	81,2	78,3		55,6	49,6	50,2	
		76,21	6	4	9	6	59,63	9	60,3	2	1
AGREGAD O GRUESO	PRIMER A TANDA		70,2					45,3	48,2	51,2	
		75,32	3	69,3	75,3	73,9	50,21	6	1	46,5	3

**Gráfica 7. Resultados permeabilidad al agua 3000 PSI**



**Gráfica 8. Resultados permeabilidad al agua 4000 PSI**



Nuevamente si se continua con el ejercicio de clasificación del concreto con GCR, se debe realizar una comparación con la norma, en la tabla 17 se observan los datos que permiten identificar la medida de la permeabilidad del concreto. Siendo consecuentes con los resultados reportados el concreto estudiado hasta el momento se puede clasificar el concreto de 3000 PSI como un concreto de alta permeabilidad al agua, mientras que el concreto de 4000 PSI se encuentra en el rango de los concretos con una moderada permeabilidad al agua. En general se puede decir que a pesar de que ocurre un cambio en la propiedad, este no es tan impactante como para hacer que se cambie de un rango a otro cuando se aumenta el porcentaje de reemplazo del grano de caucho de llanta triturada.

**Tabla 18. Clasificación permeabilidad al agua del concreto**

Determinación	Unidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coefficiente de permeabilidad al agua	M/s	$< 10^{-12}$	$10^{-12}$ a $10^{-10}$	$> 10^{-10}$
Profundidad de Penetración	Mm	$< 30$	30 a 60	$> 60$

Por otra parte para la resistencia a la compresión se cuenta con datos de dos niveles, es decir hay repetitividad de los ensayos y para este parámetro por ser el más importante para este trabajo de grado y por ser la propiedad más representativa del concreto se desarrollara un diseño experimental. Debido a que los diseños de resistencia de 3000 PSI y 4000 PSI son dos productos independientes se debe realizar dos análisis experimentales independientes pero basado en la misma metodología de diseño. El método apropiado es un análisis



del tipo factorial  $2^k$  en el cual se tiene en cuenta las siguientes consideraciones explicadas en la tabla 18

**Tabla 19. Diseño experimental**

Factor	Respuesta
Hipótesis	Hay efecto del gcr sobre la resistencia del concreto.
Hipótesis nula	No hay efecto del gcr sobre la resistencia del concreto.
VARIABLES INDEPENDIENTES	Porcentaje de reemplazo y tipo de gcr
VARIABLES DEPENDIENTES	Resistencia a la compresión
Numero de niveles	Dos niveles: % reemplazo: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%. Tipo de gcr: grano fino, grano grueso
Numero de tratamientos:	2
Tipo de diseño de experimentos	Factorial $2^k$

### 5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental permite analizar si existe un efecto de los factores sobre la variable respuesta y en qué medida están afectando. Es decir, si el tamaño de grano y el porcentaje de reemplazo tienen un efecto sobre la resistencia del concreto con GCR de manera individual o en conjunto.

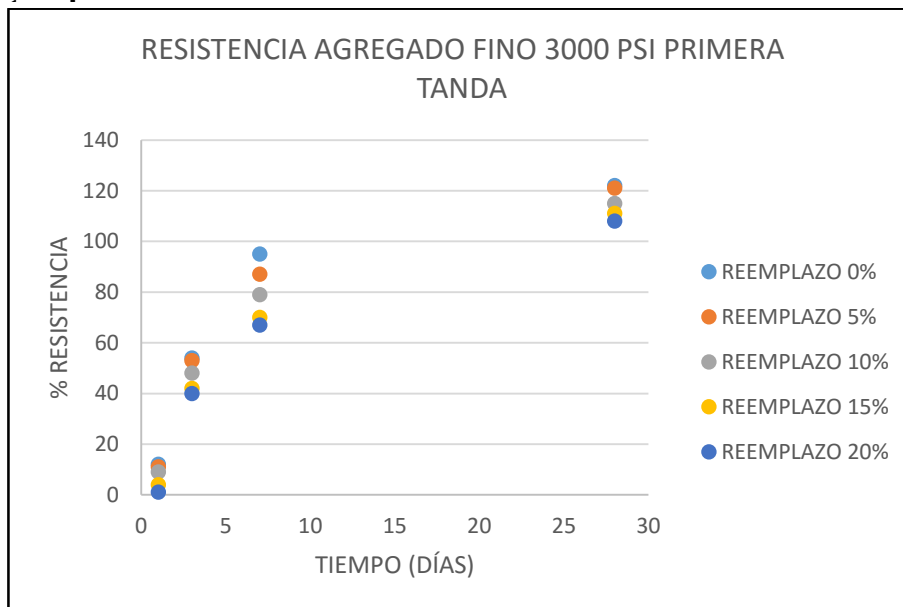
A continuación se encuentran la tabla 19 con la información del tipo de grano utilizado, el tipo de resistencia y el porcentaje de reemplazo de GCR, así como también las respectivas gráficas 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 donde se pueden analizar los resultados las resistencias evaluadas. Por un lado en la tabla 19 se encuentran consignados los resultados de la evaluación de resistencia a la compresión en la que se compara las cantidades de reemplazo de cada una de las tandas de muestras elaboradas, teniendo en cuenta si es una resistencia de 3000 o de 4000 PSI, según el tipo de GCR y adicional a esto una demanda de agua que equivale a la cantidad de agua adicional a la del diseño que se requirió para una correcta manejabilidad de la mezcla, cada mezcla se comporta de manera diferente y por esto cada una tiene un requerimiento de agua diferente el cual también se puede observar en la tabla 19.

**Tabla 20. Resultados Resistencia a la Compresión**

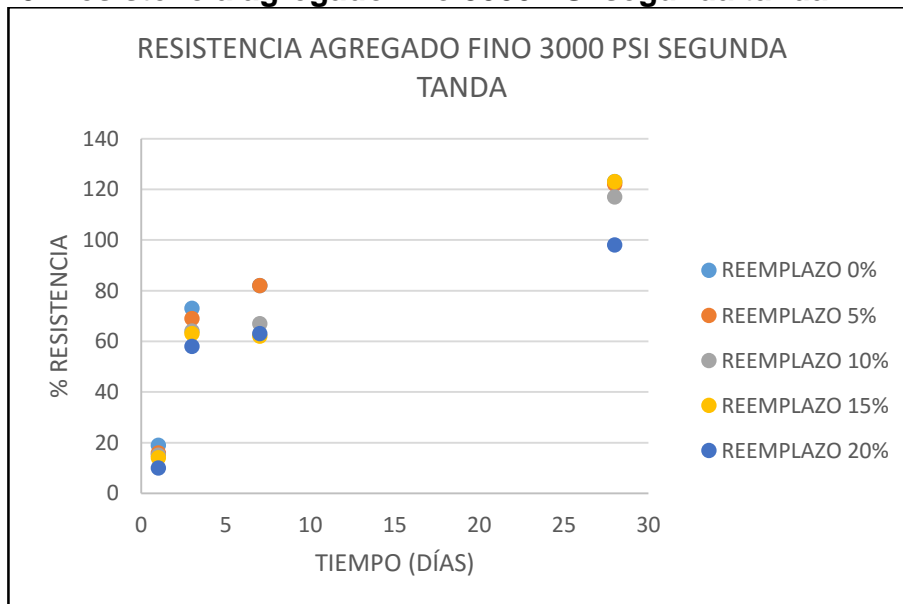
		Resistencia (%)												
		3000 psi					4000 psi					Demanda de agua		
		Dia	0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%		
Agregado fino	Primera tanda	1	12	11	9	4	1	15	11	9	4	6		
		3	54	53	48	42	40	75	72	65	35	46	+ 300 ml	+ 700 ml
		7	95	87	79	70	67	94	86	78	47	56		
		28	122	121	115	111	108	137	128	117	86	81		
	Segunda tanda	1	19	16	15	14	10	19	16	8	6	2		
		3	73	69	64	63	58	85	72	63	53	47	Agua de diseño	+ 100 ml
		7	82	82	67	62	63	98	87	83	64	55		
		28	123	122	117	123	98	146	138	123	102	88		
Agregado grueso	Primera tanda	Dia	0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%		
		1	12	10	9	8	7	13	11	9	4	2		
		3	36	34	34	30	32	83	70	63	56	48	+ 500 ml	Agua de diseño
		7	59	56	59	48	52	104	92	92	64	66		
	Segunda tanda	28	120	111	103	92	84	157	137	133	131	114		
		1	13	11	10	8	7	21	13	11	7	6		
		3	65	56	55	45	46	100	88	68	64	64	+ 400 ml	+ 100 ml
		7	81	75	63	60	54	126	110	112	99	90		
28	115	119	102	91	87	151	130	127	109	107				

A continuación se presentan las respectivas gráficas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 donde se evidencia el comportamiento de la resistencia con respecto al tiempo de curado. Para la caracterización de la resistencia se realizaron dos factores por evaluación con el fin de desarrollar un análisis de experimentos y determinar la mezcla que presenta unas mejores condiciones.

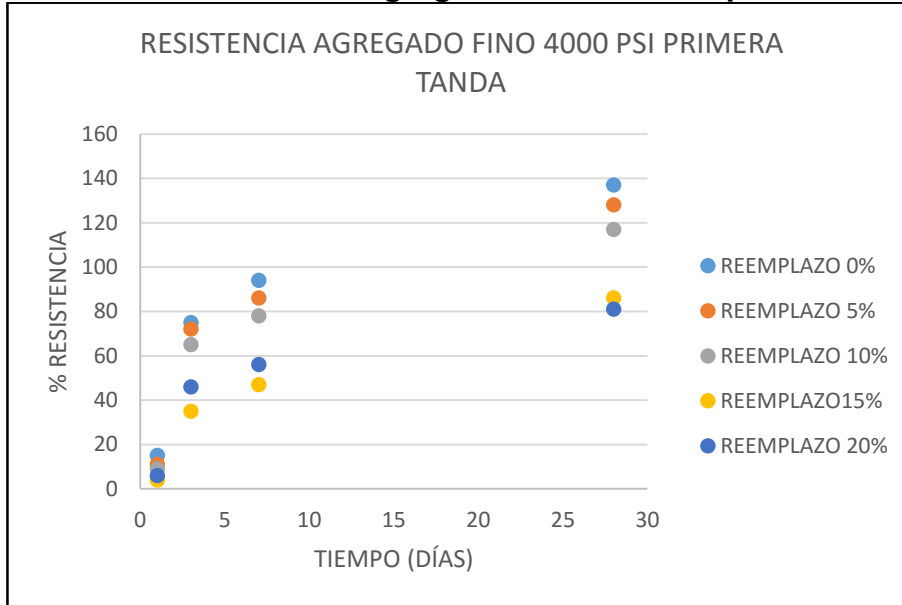
**Gráfica 9. Resistencia agregado fino 3000 PSI primera tanda**



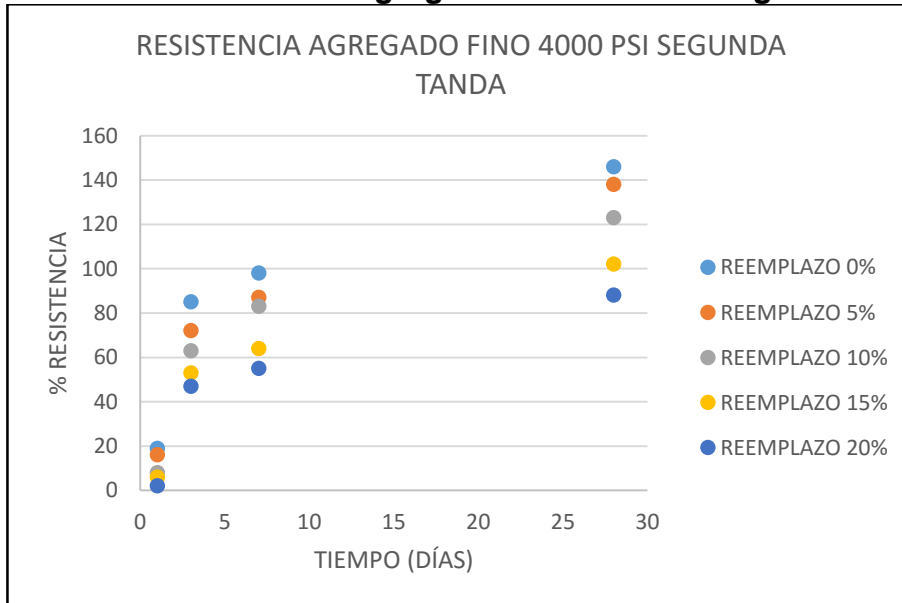
**Gráfica 10. Resistencia agregado fino 3000 PSI segunda tanda**



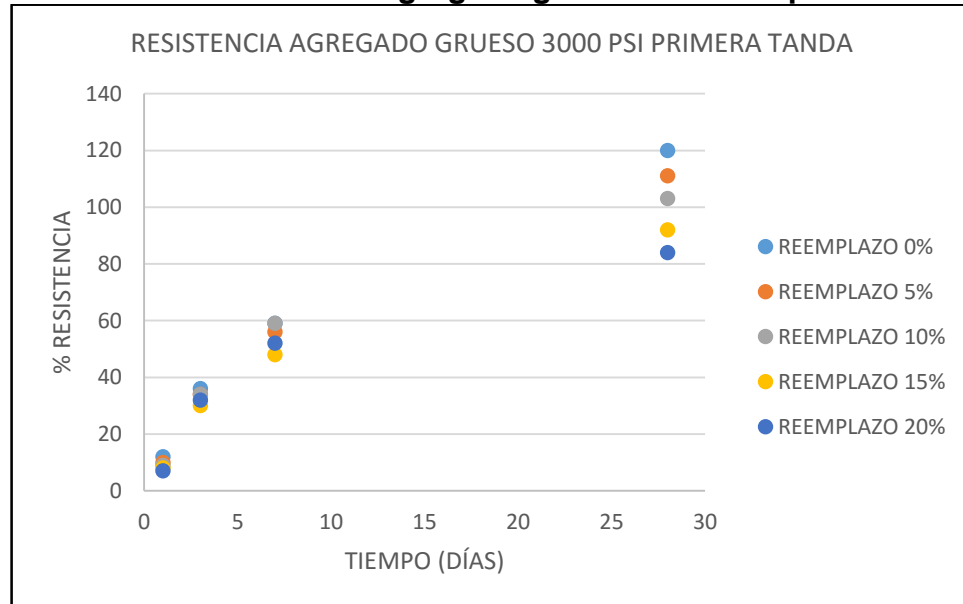
**Gráfica 11. Resistencia agregado fino 4000 PSI primera tanda**



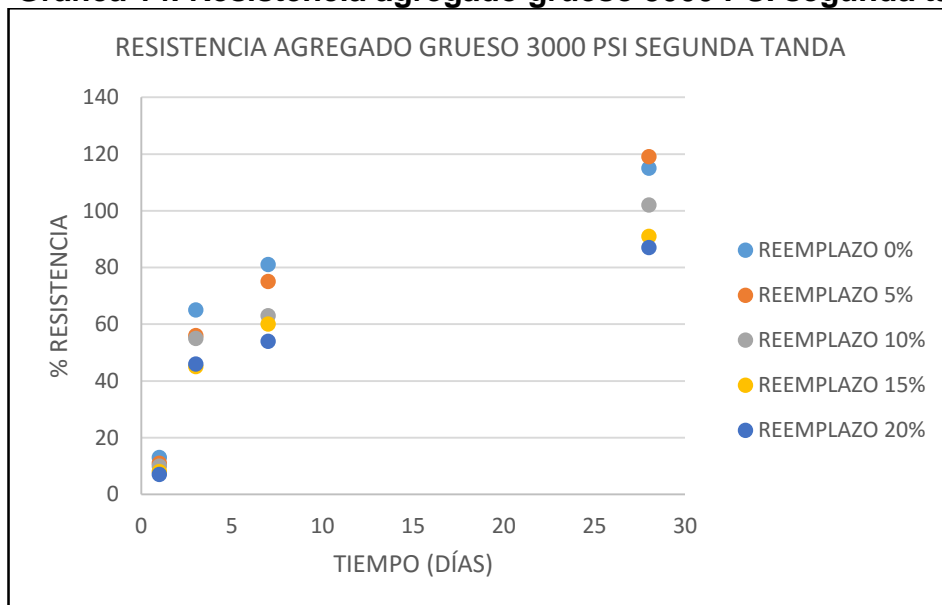
**Gráfica 12. Resistencia agregado fino 4000 PSI segunda tanda**



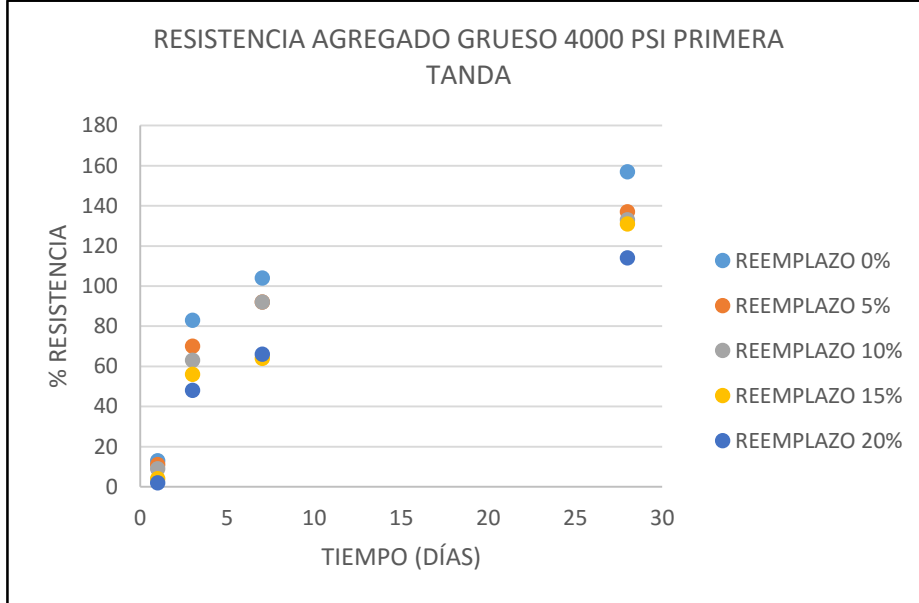
**Gráfica 13. Resistencia agregado grueso 3000 PSI primera tanda**



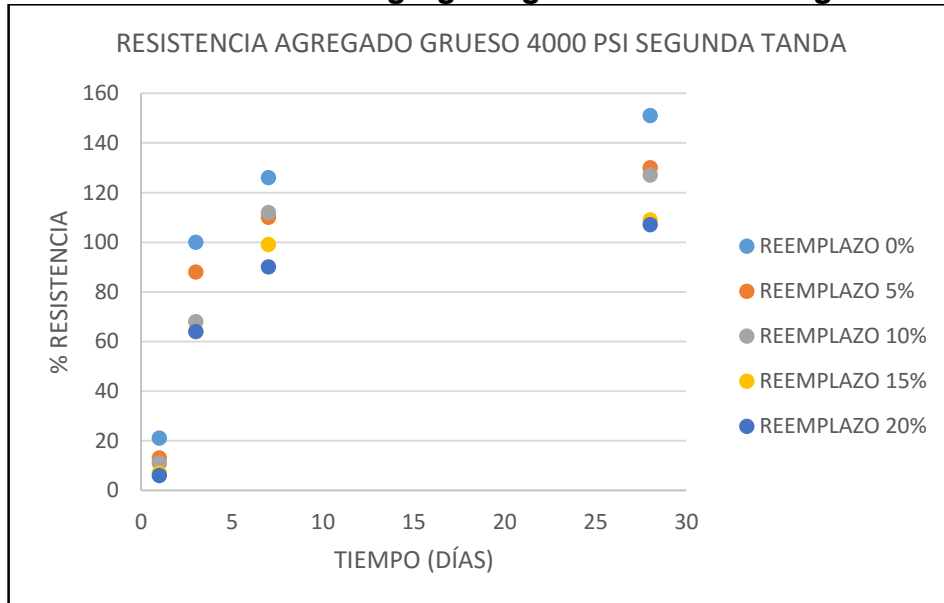
**Gráfica 14. Resistencia agregado grueso 3000 PSI segunda tanda**



**Gráfica 15. Resistencia agregado grueso 4000 PSI primera tanda**



**Gráfica 16. Resistencia agregado grueso 4000 PSI segunda tanda**



Como se puede confrontar en cada una de las gráficas el comportamiento de la resistencia es muy similar en todas las variaciones de reemplazo, aunque como era de esperarse los valores más altos serán del 0% de reemplazo y los más bajos los del 20% de reemplazo, sin embargo todos aumentan progresivamente hasta llegar a los 28 días de curado, que es el tiempo categórico fijado por la norma como edad madura

En cuanto al análisis del diseño experimental se obtiene los siguientes resultado reportados en las tablas 20 y 21 conocidas como tablas ANOVA para 3000 y 4000 PSI respectivamente. El análisis de varianza ANOVA es un instrumento estadístico que permite comprobar si existe una relación o un efecto de dos factores sobre una variable dependiente o de respuesta, la manera de plantear el problema es por medio de una hipótesis en la cual se determina lo que se desea corroborar, para este caso de estudio la hipótesis a comprobar es si existe un efecto del porcentaje de reemplazo y el tamaño de grano del GCR en la resistencia del concreto modificado. El análisis de varianza se realizó utilizando la herramienta de análisis de datos de Excel, con un valor de significancia de 0,5.

**Tabla 21. ANOVA Resistencia 3000 PSI**

Resistencia 3000 psi concreto modificado						
	0%	5%	10%	15%	20%	
Agregado fino	122	121	115	111	108	
	123	122	117	123	98	
Agregado grueso	120	111	103	92	84	
	115	119	102	91	87	
Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo						
Resumen	0	0,05	0,1	0,15	0,2	Total
<i>Agregado fino</i>						
Cuenta	2	2	2	2	2	10
Suma	245	243	232	234	206	1160
Promedio	122,5	121,5	116	117	103	116
Varianza	0,5	0,5	2	72	50	67,77777778
<i>Agregado grueso</i>						
Cuenta	2	2	2	2	2	10
Suma	235	230	205	183	171	1024
Promedio	117,5	115	102,5	91,5	85,5	102,4
Varianza	12,5	32	0,5	0,5	4,5	181,3777778
<i>Total</i>						
Cuenta	4	4	4	4	4	
Suma	480	473	437	417	377	
Promedio	120	118,25	109,25	104,25	94,25	
Varianza	12,66666667	24,91666667	61,58333333	240,9166667	120,25	

**Tabla 22. (continuación)**

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para f
Muestra	924,8	1	924,8	52,84571429	2,69599e-05	4,964602744
Columnas	1786,2	4	446,55	25,51714286	3,14177e-05	3,478049691
Interacción Dentro del grupo	281,2	4	70,3	4,017142857	0,03390665	3,478049691
	175	10	17,5			
Total	3167,2	19				

Para el diseño de mezcla de 3000 PSI se debe analizar la interacción entre los factores, la tabla 21 de ANOVA presenta variaciones entre muestras, entre columnas y entre las interacciones, reportando un valor crítico de F y un valor de respuesta de F, para comprobar la hipótesis se debe comparar si F, que es una relación de cuadrados medios y representa el efecto de las variables, es mayor que el valor crítico. Adicionalmente el parámetro F permite comparar cual es el factor que tiene mayor influencia sobre la resistencia que es la variable de respuesta. Para efectos de este desarrollo experimental se concluye en primera medida que la hipótesis es verdadera, existe un efecto de tamaño de grano y porcentaje de reemplazo de GCR en el concreto. También es posible ver en la parte final de la tabla que el porcentaje de reemplazo de tamaño de grano es la variable que tiene mayor influencia en la resistencia pues tiene un mayor valor de F y que existe además un efecto de la combinación del tipo de grano con el porcentaje de reemplazo.

**Tabla 23. ANOVA Resistencia 4000 PSI**

	RESISTENCIA 4000 PSI CONCRETO MODIFICADO				
	0%	5%	10%	15%	20%
AGREGADO FINO	137	128	117	86	81
	146	138	123	102	88
AGREGADO GRUESO	157	137	133	131	114
	151	130	127	109	107

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo

RESUMEN	0	0,05	0,1	0,15	0,2	Total
AGREGADO FINO						



**Tabla 24. (Continuación)**

Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo

Cuenta	2	2	2	2	2	10
Suma	283	266	240	188	169	1146
Promedio	141,5	133	120	94	84,5	114,6
Varianza	40,5	50	18	128	24,5	567,155556
<b>AGREGADO GRUESO</b>						
Cuenta	2	2	2	2	2	10
Suma	308	267	260	240	221	1296
Promedio	154	133,5	130	120	110,5	129,6
Varianza	18	24,5	18	242	24,5	273,6
<b>Total</b>						
Cuenta	4	4	4	4	4	
Suma	591	533	500	428	390	
Promedio	147,75	133,25	125	107	97,5	
Varianza	71,58333333	24,91666667	45,33333333	348,666667	241,666667	

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	1125	1	1125	19,1326531	0,00139018	4,96460274
Columnas	6495,3	4	1623,825	27,6160714	2,2015E-05	3,47804969
Interacción	483,5	4	120,875	2,05569728	0,16204459	3,47804969
Dentro del grupo	588	10	58,8			
Total	8691,8	19				

Como era de esperarse por la similitud de los ensayos, en el diseño de mezcla de 4000 PSI se puede concluir que la hipótesis es verdadera, si existe un efecto y esto se corrobora al observar que en cada una de las varianzas el valor crítico de F es menor que el valor arrojado por ANOVA, sin embargo como se puede revisar en la tabla 21, para el diseño de 4000 PSI el factor que tiene mayor influencia es el tamaño de grano en la variable de respuesta que es la resistencia a la compresión, aun así existe un efecto importante por parte del porcentaje de reemplazo y un efecto de la combinación de tipo de grano con porcentaje de reemplazo de GCR. Finalmente se puede interpretar de acuerdo a todo el diseño experimental y todas las evaluaciones realizadas que el concreto modificado se ve afectado de una o de otra manera por el GCR, en especial la resistencia a la compresión es la propiedad más perjudicada ya que para porcentajes altos de reemplazo los valores de resistencia no alcanzan el 100%, es decir no alcanzan la resistencia requerida por el diseño de la mezcla. Por esto se puede afirmar que la hipótesis planteada es verdadera, es decir, que existe un efecto del grano de caucho de llanta reciclada sobre la resistencia del concreto modificado.

## 6. EVALUACION DE COSTOS

Para nadie es un secreto que el factor económico es un factor decisivo y determinante a la hora de evaluar un proyecto, pues nadie quiere producir para perder o para no ganar. Por este motivo en este capítulo se desarrolla una comparación de costos de producción de un concreto convencional y uno con GCR, tomando como base de cálculo una producción de 1 metro cúbicos de concreto.

Los costos totales que influyen sobre el valor final de un producto no son exclusivamente los de la materia prima, sin embargo cuando en un nuevo producto no hay modificación del proceso productivo ya existente, no se tiene en cuenta los costos de inversión de equipos para la planta, tampoco los costos de operación y mantenimiento. Solamente se tendrá en cuenta los costos de materia prima los cuales son los que cambian puesto que se modifica la arena por el GCR.

### 6.1. COSTOS MATERIAS PRIMAS

Los costos de materias primas se encuentran sustentados por las cotizaciones enviadas por los proveedores contactados, los costos agua serán tomados desde la página de condensa, cada una de estas cotizaciones se encuentra en los anexos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

En las tablas 23 y 24 se encuentra los costos de materias primas para un diseño de 3000 y 4000 PSI respectivamente teniendo como base de cálculo un cúbico de concreto.

**Tabla 25. Costos insumos concreto convencional 3000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	244	\$ 560	\$ 136,640
Arena Rio	kg	702	\$ 51	\$ 35,858
Arena de peña	kg	175	\$ 31	\$ 5,457
Grava	kg	925	\$ 48	\$ 43,938
ceniza	kg	81	\$ 200	\$ 16,200
AGUA	kg	190	\$ 1.2	\$ 233
Aditivo 1	kg	2.7	\$ 5,081	\$ 13,718
TOTAL				\$ 252,043

**Tabla 26. Costos insumos concreto convencional 4000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	260	\$ 560	\$ 145,600
Arena Rio	kg	698	\$ 51	\$ 35,654
Arena de peña	kg	174	\$ 31	\$ 5,425
Grava	kg	968	\$ 48	\$ 45,980
ceniza	kg	87	\$ 200	\$ 17,400
Agua	kg	168	\$ 1.2	\$ 206
Aditivo 1	kg	2.6	\$ 5,081	\$ 13,210
Aditivo 2	kg	1.6	\$ 7,238	\$ 11,581
TOTAL				\$ 275,056

Para realizar la comparación es necesario seleccionar un porcentaje de reemplazo de los trabajados a lo largo de la experimentación, con el fin de tener los costos más altos posibles se seleccionó el porcentaje más alto, es decir, 20 % de reemplazo, se entiende por hecho que a un menor porcentaje de reemplazo el costo va a disminuir. El reemplazo del 20% se va a distribuir teniendo en cuenta las densidades de los dos tipos de arena (2,4 kg/m<sup>3</sup> para la arena de rio y 1,6 kg/m<sup>3</sup> para la arena de peña), dicho esto se va a reemplazar 15% de arena de rio y 5% de arena de peña. Dichos reemplazos se deben realizar con base en el volumen para evitar modificar la base de cálculo de 1m<sup>3</sup> de concreto. A continuación en las tablas 25, 26, 27 y 28 se relacionan los costos de materia prima incluyendo el GCR, para concretos modificados al 20 % de reemplazo con grano grueso y grano fino, respectivamente en cada uno de los diseños de mezcla de 3000 y 4000 PSI.

**Tabla 27. Costos insumos concreto con R-30 de 3000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantida	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	244	\$ 560	\$ 136,640
Arena Rio	kg	596.7	\$ 51	\$ 30,479
Arena de peña	kg	166.25	\$ 31	\$ 5,184
Grava	kg	925	\$ 48	\$ 43,938
ceniza	kg	81	\$ 200	\$ 16,200
AGUA	kg	190	\$ 1.2	\$ 233
Aditivo 1	kg	2.7	\$ 5,081	\$ 13,718
GCR Fino	kg	39.97	\$ 800	\$ 31,976
TOTAL				\$ 278,368

**Tabla 28. Costos insumos concreto con R-30 de 4000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantida	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	260	\$ 560	\$ 145,600
Arena Rio	kg	593.3	\$ 51	\$ 30,306
Arena de peña	kg	165.3	\$ 31	\$ 5,154
Grava	kg	968	\$ 48	\$ 45,980
ceniza	kg	87	\$ 200	\$ 17,400
Agua	kg	168	\$ 1.2	\$ 206
Aditivo 1	kg	2.6	\$ 5,081	\$ 13,210
Aditivo 2	kg	1.6	\$ 7,238	\$ 11,581
GCR Fino	kg	39.7	\$ 800	\$ 31,760
TOTAL				\$ 301,197

Al comparar costos de insumos para los diseños de 3000 y 4000 PSI utilizando el mismo tipo de grano fino R-30 se puede observar que la mezcla de concreto de 4000 PSI tiene un costo inferior, tal como también ocurre en el concreto convencional. Sin embargo tiene un incremento en el costo de aproximadamente \$30.000, es decir aumenta un 11%.

**Tabla 29. Costos insumos concreto con R-6 para 3000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantida	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	244	\$ 560	\$ 136,640
Arena Rio	kg	596.7	\$ 51	\$ 30,479
Arena de peña	kg	166.25	\$ 31	\$ 5,184
Grava	kg	925	\$ 48	\$ 43,938
ceniza	kg	81	\$ 200	\$ 16,200
AGUA	kg	190	\$ 1.2	\$ 233
Aditivo 1	kg	2.7	\$ 5,081	\$ 13,718
GCR Grueso	kg	42.4	\$ 800	\$ 33,920
TOTAL				\$ 280,312

**Tabla 30. Costos insumo concreto con R-6 para 4000 PSI**

Insumo	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Argos Cemento gris	kg	260	\$ 560	\$ 145,600
Arena Rio	kg	593.3	\$ 51	\$ 30,306
Arena de peña	kg	165.3	\$ 31	\$ 5,154
Grava	kg	968	\$ 48	\$ 45,980
ceniza	kg	87	\$ 200	\$ 17,400
Agua	kg	168	\$ 1.2	\$ 206
Aditivo 1	kg	2.6	\$ 5,081	\$ 13,210
Aditivo 2	kg	1.6	\$ 7,238	\$ 11,581
GCR Grueso	kg	42.2	\$ 800	\$ 33,760
TOTAL				\$ 303,197

Para el concreto con grano grueso R-6 también existe esa diferencia de costos entre los dos diseños de mezcla y continua siendo el diseño de mezcla de 4000 PSI el más económico, de igual manera aumenta el costo aproximadamente en \$30.000 es decir cuesta 11% más que un concreto convencional.

Ahora bien si se realiza un análisis por otra lado en cuanto al tamaño de grano es claro en los resultados de las tablas que los dos diseños de mezcla con CGR grueso son menos costosos, debido a que el grano grueso por tener un proceso menos de trituración es más económico. Quiere decir entonces que a pesar de que el incremento en costos es realmente significativo se podría decir que un concreto con GCR grueso y para un concreto de resistencia de 4000 PSI es la alternativa más económica para la empresa.

En general es claro que el proyecto económicamente no es viable pues el incremento en los costos de materia prima es sustancial y en un mercado tan competitivo no es provechoso tener un producto que en cuanto a características mecánicas no ofrezca un beneficio y que su costo tampoco sea ventajoso.

## 7. CONCLUSIONES

Finalmente luego de culminar la experimentación y el análisis de los resultados de las apreciaciones realizadas para valorar el comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada en el concreto, a diferentes niveles de porcentajes de reemplazo y utilizando dos tipos de GCR uno grueso y uno fino se puede llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- La información técnica sobre la caracterización del material de caucho como agregado es escasa debido a que la mayoría de proyectos están en desarrollo de investigación y el uso comercial es aun limitado y por ende el conocimiento es restringido. Sin embargo al realizar la caracterización del material se logra concluir que el GCR tiene un comportamiento como agregado ligero en cualquiera de las dos presentaciones de tipo de grano, es decir que se utiliza para reemplazar arena mas no grava.
- En cuanto a la evaluación del concreto ya modificado con CGR se puede observar que todas las propiedades en estado fresco del concreto tuvieron variantes, aun así estos cambios no representa un inconveniente para la preparación de la mezcla pues sigue conservando los límites establecidos por las normas y por la experiencia. Por el lado del asentamiento la disminución quiere decir que el GCR hace que la mezcla tenga una menor fluidez sin volverla completamente seca y rígida, para el contenido de aire ocurre lo contrario, presenta un aumento que indica que la mezcla tiende a retener más aire, lo que se traduce en poros al pasar al estado endurecido.
- En el estado endurecido las propiedades también presentan unas variaciones, estas particularmente son de tendencia hacia la caída, es decir la resistencia y la durabilidad disminuyen y esta disminución se hace más evidente al aumentar el porcentaje de reemplazo de GCR independientemente del tipo de grano y de la capacidad de resistencia del diseño de la mezcla. De acuerdo a los resultados aunque las propiedades disminuyeron, debido al reemplazo en porcentajes relativamente bajos, esta disminución no hace que el producto no pueda ser útil, es decir, el concreto modificado con GCR se podría utilizar comercialmente.
- La resistencia a la compresión disminuyo significativamente al aumentar el porcentaje de reemplazo en comparación con la mezcla patrón, esto ocurre debido a la baja adherencia que tiene el caucho con la pasta, adicional a esto las propiedades mecánicas de los dos componentes son diferentes ya que el caucho tiende a deformarse bajo efectos de presiones o cargas mientras que la pasta que lo recubre cuando ya ha endurecido tiene a ser rígida. Esto mismo ocurre con el módulo elástico estático.

- La permeabilidad al agua del concreto modificado con GCR no presenta una variación marcada frente al concreto convencional, es decir el caucho no presenta ningún tipo de efecto impermeabilizante en el concreto. Mientras que la penetración de cloruros si presenta una leve disminución a medida que incrementa el porcentaje de reemplazo, esto se debe a que el caucho crea una barrera protectora debido a su cualidad de tener una baja reactividad a compuestos como los cloruros.
- El concreto con grano de caucho de llanta triturada es una clara alternativa para mitigar el impacto ambiental generado por las llantas desechadas, pues utiliza como materia prima un producto que a pesar de tener numerosas opciones en el reciclaje, hasta el momento sigue siendo un problema ambiental significativo para muchas ciudades en el mundo, sin embargo no le brinda al concreto ningún beneficio en cuanto a sus propiedades mecánicas, por esta razón es un producto que tiene limitaciones comerciales y un sigue siendo un gran tema de investigación.
- La comparación de costos de concreto convencional con el concreto modificado es claro arrojando resultados negativos, es decir, económicamente el producto no es viable, pues el costo de la arena que es el materia que se busca reemplazar es menor al costo del GCR. Este es un factor determinante puesto que para ninguna empresa es provechoso ofrecer un producto más costoso pero sin ofrecer ventajas.

## 8. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para trabajos y proyectos de investigación que se puedan derivar de este proyecto se sugieren las siguientes recomendaciones.

- Para futuras investigaciones se recomienda profundizar en los métodos de caracterización del grano de caucho de llanta reciclada, así como también es importante realizar una revisión sobre posibles pre-tratamientos al GCR para aumentar su propiedad de adherencia a la pasta del concreto.
- Se recomienda realizar mezclas de concreto donde se empleen los dos tipos de GCR combinados igualmente en porcentajes bajos de reemplazo, para tener una visión sobre posibles afectaciones en el asentamiento, en el contenido de aire y en la resistencia.
- Para otras investigaciones se recomienda evaluar el concreto no para estructura sino como un material de pavimentación, es decir realizar evaluaciones flexión, esto permitirá darle otro sentido al uso del GCR en el concreto.



## BIBLIOGRAFÍA

ALBANO CAMACHO, N, HERNANDEZ, M, BRAVO, A, GUEVARA, H. Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamanos de particulas. En : Revista de la Facultad de Ingenieria Universidad Central de Venezuela. [En línea] Vol 23.No. 1, 2008, p3-10.

ANGULO RODRIGUEZ, Ricardo Alberto y DUARTE AYALA, José Luis. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingenierías, 2005.

Artículo Aprovechamiento de llantas y neumáticos - Universidad Nacional Abierta y a Distancia. [En línea]. Disponible en :<[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358043/exe/leccin\\_29\\_aprovechamiento\\_de\\_llantas\\_y\\_neumticos.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358043/exe/leccin_29_aprovechamiento_de_llantas_y_neumticos.html)>[Citado el 12 de marzo de 2016].

Articulo Cemento Argos. Historia Argos Colombia. [En línea]. Disponible en: <<http://www.argos.co/colombia/somos/historia>>[Citado el 12 de marzo de 2016].

Artículo Planta trituradores de llantas. Industrias Gercons Colombia- Productos plantas trituradoras de llantas [En línea]. Disponible en:<<http://www.gerconscolombia.com/index.php/productos/plantas-trituradoras-de-llantas>> [Citado el 12 de marzo de 2016].

Articulo Reciclaje de llantas para asfalto-Bionero [En línea]. Disponible en: <<http://www.bionero.org/econegocios/llancreto-reciclado-de-llantas-para-un-asfalto-ecologico>>[Citado el 12 de marzo de 2016].

Articulo Resistencia mecanica del concreto y la resistencia a la compresion. Blog 360°. [En línea]. Disponible en: <<http://blog.360gradosenconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>>[Citado el 12 de marzo de 2016].

COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1259.( 19 de Diciembre de 2008). Por lo cual se crea e implementa el Comparendo Ambiental. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2008.

COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1333.( 21 de Julio de 2009). Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2009.

COLOMBIA.CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1280.( 29 de Julio de 2010). Por lo cual se establece la escala tarifaria para el cobro de los servicios de evaluacion y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, coneciones,

autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2009.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Acuerdo 257(27 de Diciembre de 2011). Por lo cual se dictan normas básicas sobre la estructura, organización y funcionamiento de los organismos y de las entidades de Bogotá, distrito capital, y se expide otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2011.

FLECHAS MURCIA, William Abelardo. Propuesta para la producción industrial de asfaltos modificados con caucho proveniente de neumáticos usados para la empresa Dinasfaltos. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. Facultad de Ingenierías, 2002.

GARCIA CABRERA, María Alejandra. Factibilidad de sustituir del agregado fino del concreto por fibras de termoplásticos y elastómeros reciclados. Tesis de grado. Ingeniería Mecánica. Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingenierías, 2007.

GONZÁLEZ SANDOVAL, Federico. Manual de supervisión de obras de concreto. México: Limusa, 2002.

GUEVARA, Carlos. Cada día más de 2.050 llantas terminan invadiendo el espacio público. En: El tiempo. Bogotá D, C. 2, Marzo, 2015.

HERRERA SOSA, E. S., MARTÍNEZ BECERRA, G., BARRERA DIAZ, C., & CRUZ ZARAGOZA, E. Materiales Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto. Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción. España: OmniaScience, 2015. 73-93 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p  
\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008. 45 p.  
\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998. 33 p.

JOO HERRAN, Gonzalo. Comportamiento del concreto con el aditivo plastificante-reductor de agua y retardante de fragua EUCO WR51. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingenierías, 2003.

MAVROULIDOU M., FIGUEIREDO J. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres. En: GlobalNEST. Septiembre, 2010, vol12 no. 4, p. 359-367.

PEÑALOZA GARZÓN, Cristian Román. Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen de agregado fino para un concreto con fines de uso estructural. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingenierías. 2015.

Redacción Cali. Crean planta para reciclar llantas del Eje Cafetero y el Suroccidente. En: El tiempo. Cali. 17, Noviembre, 2014.


Redacción de El País. Sector de la construcción, motor del crecimiento de la economía. En: El País. Cali. 18, Marzo, 2015.

TORRES OSPINA, Andrés Hermes. Valoración de las propiedades mecánicas del Asfalto Modificado con grano de llanta reciclado. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad de Ingeniería, 2014.

VALENCIA ERAZO Herwin , RAMOS ROJAS Natalia. Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo. Trabajo de grado. Ingeniería Civil e Industrial. Santiago de Cali. Pontificia Universidad Javeriana. Departamento de Ingenierías.

VARGAS JIMENEZ, Nelson Eduardo, RODRIGUEZ Fabio Alonso. Diagnóstico de las Condiciones Superficiales y Evaluación del Comportamiento Estructural del Pavimento de las Vías Construidas por el Instituto de Desarrollo Urbano con Asfalto Modificado con Caucho Reciclado de Llantana (GCR). Monografía. Ingeniería Civil. Facultad de Ingenierías. 2014.

**ANEXOS**  
**ANEXO A.**  
**COTIZACION CONCRETO CONVENCIONAL 3000 PSI**

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;"> <p><b>LISTA DE PRECIOS CONSTRUCCIÓN</b></p> </div> <div style="text-align: right;">  <p><b>CONSTRUYENDO CONFIANZA</b></p> </div> </div>								
<b>Sugerida al Público - Vigente Febrero 16 de 2016</b>								
PRODUCTO	CÓDIGO	CANTID.	UN	UN EMB.	\$ UN	EMPAQUE	IVA 19%	TOTAL
<b>ADITIVOS PARA CEMENTOS</b>								
Sika <sup>2</sup> -2	110000	2.5 kg	kg	12	14,280	35,700	5,272	41,412
Sellador de filtraciones.	110001	5.5 kg	kg	6	12,500	71,064	11,370	82,430
<b>ADITIVOS PARA MORTEROS</b>								
Sika <sup>2</sup> -1	110200	1.0 kg	kg	20	8,950	8,950	1,432	10,382
Impermeabilizante integral para morteros y concretos. (NUEVA TECNOLOGIA)	110200	2.0 kg	kg	12	8,830	17,660	2,826	20,486
	110208	4.0 kg	kg	6	8,650	34,600	5,536	40,136
	110202	20.0 kg	kg	1	7,000	140,000	22,400	162,400
	110204	60.0 kg	kg	1	6,630	397,800	63,648	461,448
	110240	220.0 kg	kg	1	4,160	915,200	146,432	1,061,632
Sika <sup>2</sup> -3	110101	5.0 kg	kg	6	8,580	47,550	6,808	45,358
Accelerante para morteros.								
SikaBond PVA	110706	1.0 kg	kg	20	8,180	8,180	1,309	9,489
Emisión polimérica que mejora la adhesión y la calidad de los morteros cementosos y los estucos.	110701	4.0 kg	kg	6	7,430	29,720	4,755	34,475
	110702	20.0 kg	kg	1	6,370	127,400	20,384	147,784
	110740	200.0 kg	kg	1	5,280	1,022,000	163,520	1,185,520
Sikal Joox <sup>2</sup>	110406	0.25 kg	kg	20	33,000	8,450	1,352	9,802
Aditivo adherente para morteros.	110401	4.5 kg	kg	6	20,900	94,050	15,048	109,098
	110402	20.0 kg	kg	1	19,400	388,000	62,080	450,080
	110440	200.0 kg	kg	1	16,200	3,240,000	518,400	3,758,400
SikaViscoBond	110600	0.6 kg	kg	20	20,700	12,420	1,907	14,407
Aditivo tipo látex para mejorar adherencia, impermeabilizar, plastificar y mejorar resistencias en morteros y concretos.	110601	3.2 kg	kg	6	18,300	58,560	9,370	67,930
	110602	19.0 kg	kg	1	12,720	327,880	52,349	379,229
	110640	200.0 kg	kg	1	13,570	2,714,000	442,040	3,246,040
SikaTard <sup>2</sup> E	114240	230.0 kg	kg	1	5,850	1,345,500	215,280	1,560,780
Retardador - reductor de agua para morteros de larga vida.								
Sikanol <sup>2</sup> M	114740	200.0 kg	kg	1	3,950	790,000	126,400	916,400
Estabilizador para morteros de larga vida.								
<b>ADITIVOS Y ADICIONES PARA CONCRETO</b>								
SikaPlast <sup>2</sup> MO	103101-01	5.0 kg	kg	6	6,240	31,200	4,792	36,992
Superplastificante - Reductor de agua de alto rango	103102-01	20.0 kg	kg	1	5,280	105,600	16,896	122,496
	103140-01	230.0 kg	kg	1	4,230	972,900	155,664	1,128,564
Sikaser <sup>2</sup> L	105001	5.0 kg	kg	6	9,660	48,300	7,728	56,028
Accelerante de fraguado y resistencia para concretos.	105002	25.0 kg	kg	1	8,400	210,250	33,640	243,890
	105040	230.0 kg	kg	1	4,860	1,117,800	178,848	1,296,648
Plastacrete <sup>2</sup> tes HE	105440	230.0 kg	kg	1	4,380	1,032,400	161,884	1,194,284
Plastificante - acelerante para concretos.								
SikaFalt <sup>2</sup>	100802	25.0 kg	kg	1	5,900	147,500	23,600	171,100
Fiducificante para mezclas de concreto.	100840	230.0 kg	kg	1	3,850	885,500	141,640	1,027,140
Sikafiber <sup>2</sup> AD	142657	1.0 kg	kg	10	15,860	15,860	2,538	18,398
Mix o fibra de polipropileno para concreto y mortero.								
Plastacrete <sup>2</sup> DM	103001	4.5 kg	kg	6	9,000	40,545	6,487	47,032
Impermeabilizante para concreto - plastificante.	103002	20.0 kg	kg	1	8,360	167,200	26,752	193,952
	103040	230.0 kg	kg	1	5,500	1,265,000	202,400	1,467,400

LISTA DE PRECIOS FEBRERO 16 DE 2016

1

SIKA COLOMBIA S.A.S.

**ANEXO B.  
COTIZACION CONCRETO CONVENCIONAL 3000 PSI**

<b>COTIZACIÓN :</b>	<b>328</b>	FECHA	
---------------------	------------	-------	--

 <p><b>GRUPO FERRETERO</b> <b>Solufér</b> NIT. 900.762.496-3 IVA REGIMEN COMUN</p>	Actividad Económica 4663 Res. DIAN No. 32001184663 Fecha : 2014/09/16 No. Autorizada. Del FV 1 al FV 5000 Distribuidores Mayoristas de Herramientas, Materiales para la Construcción, Herramienta Eléctrica, Cables de Acero, Artículos Eléctricos.
---	--

SEÑORES	Laura Carolina Venegas Ramirez	NIT:	
DIRECCIÓN	Bogotá Colombia	TEL:	

Atendiendo su amable solicitud estamos enviando cotización de los productos requeridos para su consideración

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND/MED	CANT	Vt. UNITARIO	Vt. TOTAL
1	Argos bulto Cemento gris	kg	260	560.00	145,600
2	Arena Rio	kg	698	51.08	35,654
3	Arena de peña	kg	174	31.18	5,425
4	Grava	kg	968	47.50	45,980
5	ceniza	kg	87	200.00	17,400

Enviar a:		SUBTOTAL	250,059
Dirección:		IVA	16.00% 40,009
Ciudad:		40,009	
Teléfono:			
		<b>VALOR TOTAL</b>	<b>290,069</b>

<b>CONDICIONES COMERCIALES:</b>	
<b>SOMO GRANDE CONTRIBUYENTE Res. 000041 30/01/2014 - AUTORETENEDORE</b>	
1. PRECIOS VIGENTES HASTA AGOTAR ANTICIPO. AVISO DE ALZA CON 48 HORAS PARA CONSIGNACION Y SOSTENIMIENTO DE PRECIOS.	
2. ENTREGA: Según programación entre ocho (8) y diez (10) días hábiles una vez enviada la OC y cumplidas las condiciones de pago.	
3. DESCARGUE: Lo asume el cliente, el material se entrega en obra sobre plataforma del vehículo.	
4. TRANSPORTE: Los pedidos inferiores a 2 TON y/o por un valor inferior tienen costo adicional por flete.	
5. FIGURADO: Los pedidos se pasan a producción una vez se encuentre verificado el despiece y la carilla se encuentre aprobada.	
6. CEMENTO: Despachos desde cinco (5) TON zona urbana.	
7. El destinatario debe garantizar el fácil y seguro acceso de los vehículos en el sitio de descarga, de lo contrario asumirá los sobrecostos.	
8. El tiempo promedio de descarga en obra es de 5 TON hora, si se presentan demoras en obra el destinatario asumirá el costo por el tiempo adicional del vehículo.	

**ANEXO C.  
COTIZACION ADITIVOS PARA EL CONCRETO**

<b>COTIZACIÓN :</b>	<b>328</b>	FECHA	
---------------------	------------	-------	--

 <p><b>GRUPO FERRETERO</b> <b>Solufer</b> S.A.S. NIT. 900,762,496-3 IVA REGIMEN COMUN</p>	Actividad Económica 4663 Res. DIAN No. 32001184683 Fecha : 2014/09/16 No. Autorizada. Del FV 1 al FV 5000 Distribuidores Mayoristas de Herramientas, Materiales para la Contrucción, Herramienta Eléctrica, Cables de Acero, Artículos Eléctricos, Tuberías
--	--

SEÑORES	Laura Carolina Venegas Ramirez	NIT:	
DIRECCIÓN	Bogotá Colombia	TEL:	

Atendiendo su amable solicitud estamos enviando cotización de los productos requeridos para su consideración.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND/MED	CANT	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
1	Argos bulto Cemento gris	kg	244	560.00	136,640
2	Arena Rio	kg	702	51.08	35,858
3	Arena de peña	kg	175	31.18	5,457
4	Grava	kg	925	47.50	43,938
5	ceniza	kg	81	200.00	16,200

Enviar a:		SUBTOTAL	238,092
Dirección:		IVA	18.00% 38,095
Ciudad:		38,095	
Teléfono:			
		<b>VALOR TOTAL</b>	<b>276,187</b>

**CONDICIONES COMERCIALES:**

**SOMOS GRANDES CONTRIBUYENTES Reg. 000041 30/0172014 - AUTORETENEDORES**

1. PRECIOS VIGENTES HASTA AGOTAR ANTICIPO. AVISO DE ALZA CON 48 HORAS PARA CONSIGNACION Y SOSTENIMIENTO DE PRECIOS.
2. ENTREGA: Según programación entre ocho (8) y diez (10) días hábiles una vez enviada la OC y cumplidas las condiciones de pago.
3. DESCARGUE: Lo asume el cliente, el material se entrega en obra sobre plataforma del vehículo.
4. TRANSPORTE: Los pedidos inferiores a 2 TON y/o por un valor inferior tienen costo adicional por flete.
5. FIGURADO: Los pedidos se pasaran a producción una vez se encuentre verificado el despiece y la cartilla se encuentre aprobada.
6. CEMENTO: Despachos desde cinco (5) TON zona urbana.
7. El destinatario debe garantizar el fácil y seguro acceso de los vehículos en el sitio de descargue, de lo contrario asumirá los sobrecostos que se g
8. El tiempo promedio de descargue en obra es de 5 TON hora, si se presentan demoras en obra el destinatario asumirá el costo por el tiempo de es