

**DISEÑO ÓPTIMO Y ANÁLISIS MECÁNICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO
ESTRUCTURAL CON AGREGADO RECICLADO**

**SILVIA NATHALIA CAMACHO JAIMES
EDWAR MANUEL SUÁREZ LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**DISEÑO ÓPTIMO Y ANÁLISIS MECÁNICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO
ESTRUCTURAL CON AGREGADO RECICLADO**

SILVIA NATHALIA CAMACHO JAIMES

EDWAR MANUEL SUÁREZ LÓPEZ

Trabajo de grado para optar el título de:

INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ

Ingeniero Civil, MSc., M.Eng., PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A **Dios** por ser mi constante apoyo, fortaleza e inspiración en todos los proyectos que deseo emprender.

A mis **padres**, por su voto de confianza, por su gran amor y por ser ejemplos de dedicación y constancia en mi vida.

A mis hermanas por ser quienes me motivan a trabajar, a estudiar y a ser un ejemplo de profesional integral y de mujer a seguir.

Silvia Nathalia Camacho Jaimes

DEDICATORIA

A la persona más especial en mi vida, la que siempre me acompaña en todo momento y me motiva a ser mejor cada día, quien me guía, me inspira, me fortalece y me permite soñar, a Ti **Dios**, gracias por permitirme aprender de muchas personas durante esta etapa de mi vida y permitirme cumplir un sueño de muchos que me has dado.

A mis **padres** quienes con mucho esfuerzo se han privado de muchas cosas por ayudarme, gracias por su amor, por cada palabra de aliento y apoyo incondicional, gracias porque son un motivo muy especial para salir adelante.

A mi Hermana **Blanca Lucia** (Kokito), por cada palabra de ánimo y su apoyo incondicional, gracias por impulsarme a ser un ejemplo.

A **Genny (DTY)**, por acompañarme durante los últimos años de mi carrera, por apoyarme y animarme en cada momento, gracias por ser tan especial conmigo, por motivarme a seguir adelante.

A mis **familiares** quienes me han brindado su apoyo incondicional y me ha apoyado en esta etapa.

A la familia **Chacón Pelayo**, por su apoyo incondicional y su ayuda en muchas situaciones.

A mis **Amigos**, quienes me han ayudado y acompañado en este proceso, a Celemente y su familia, a Danilo, Pacho, Robín y demás, quienes me ha apoyado y me han acompañado en esta etapa de mi vida.

Edwar Manuel Suárez López

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la compañía de concretos PREVESA SAS., quien hizo un gran aporte en la investigación, se contó con su apoyo económico, su respaldo y dirección en el desarrollo de los laboratorios, liderada por el ingeniero Oscar Mauricio Sierra Acuña, y sus auxiliares Édison Useda y Heliodoro Basto. Al director del proyecto, profesor Luis Eduardo Zapata Ordúz por su constante apoyo y dirección en el transcurso del proyecto. Al Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander y su personal de apoyo liderado por Jairo Hernández. A los Laboratorios de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander, Microscopia SEM- Parque Tecnológico Guatiguará y Microscopia Óptica– Ingeniería Metalúrgica, y a su personal por los servicios prestados para la adquisición de datos.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	16
1. ESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo General.....	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.....	21
3.1.1 Propiedades del Concreto.	21
3.1.2 Concreto con Agregados Reciclados	22
4. FASE EXPERIMENTAL.....	23
4.1 Selección y caracterización del material.....	23
4.1.1 Granulometría	24
4.1.2 Densidad y Absorción.	25
4.1.3 Masas Unitarias.	25
4.1.4 Contenido de Materia Orgánica.	25
4.1.5 Desgaste de agregados gruesos.....	25
4.2 Diseño de mezcla.....	27
4.2.1 Ensayo de laboratorio para concreto en estado fresco. Asentamiento.	27
4.3 Análisis Mecánico.....	28
4.3.1 Ensayo de Resistencia a la compresión.....	29
4.3.2 Ensayo de Resistencia a Flexión.....	31
4.3.3 Ensayo de Resistencia a tracción indirecta.....	32
4.3.4 Ensayo de Modulo de Elasticidad.	33

4.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	34
4.5 Análisis de microscopia óptica	35
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	36
5.1 Análisis de desgaste de AGR y AGN en condición S.S.S.....	36
5.2 Curvas de evolución de resistencia a la compresión para diseños de mezcla con 0, 25, 50, 75 y 100 % de AGR.	37
5.3 Análisis estadístico para encontrar diseño de mezcla óptimo de AGR y AGN a la compresión a los 28 días	41
5.3.1 Medidas de tendencia central, de dispersión y de forma.....	41
5.3.2 Análisis de Varianza (ANOVA).....	44
5.3.3 Prueba de Múltiples Rangos.....	45
5.4 Análisis mecánico de mezcla óptima de AGR a los 7 días y de una mezcla de concreto convencional de AGN.	48
5.4.1 Análisis de mezclas sometidas a compresión	48
5.4.2 Análisis de mezclas sometidas a flexión.....	49
5.4.3 Análisis de mezclas sometidas a tracción indirecta.....	50
5.4.4 Módulo de elasticidad de mezclas.	51
5.5 Análisis de la microestructura de la interface agregado-matriz por medio de microscopia electrónica SEM	52
5.5.1 Análisis SEM para la mezcla de concreto convencional, 100% AGN.....	52
5.5.2 Análisis SEM para la mezcla de concreto óptima.	54
5.6 Análisis de la microestructura de la interface agregado-matriz por medio de microscopia óptica.	56
5.7 Análisis de costos de mezcla de concreto con AGR y de concreto convencional (100% AGN).....	59
6. CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Material reciclado.	23
Imagen 2. Cilindros de falla a la compresión a los 28 días de 100mm de diámetro por 200 mm de altura.	29
Imagen 3. Ensayo de compresión a los 28 días.	30
Imagen 4. Ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión.	31
Imagen 5. Ensayo de tracción indirecta.	33
Imagen 6. Cilindro fallado a tensión indirecta.	33
Imagen 7. Equipo para el módulo de elasticidad (a) espécimen 150 x 300 mm en el cabeceador de plato fijo, (b) Indicador de cuadrante para medir la deformación. .	34
Imagen 8. Muestras de concreto recubiertas de carbono.	52
Imagen 9. Micrografía realizada a la muestra de concreto convencional, 100% AGN.	53
Imagen 10. Micrografía realizada a la muestra de concreto convencional.	54
Imagen 11. Micrografía realizada a la muestra de concreto óptima.	55
Imagen 12. Micrografía realizada a la muestra de concreto reciclado óptima.	56
Imagen 13. Muestra de concreto convencional pulida.	57
Imagen 14. Muestra de concreto óptimo pulida.	57
Imagen 15. Microscopia óptica de la mezcla de concreto convencional.	58
Imagen 16. Microscopia óptica de la mezcla de concreto óptima.	58
Imagen 16. Microscopia óptica de la mezcla de concreto óptima.	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Granulometría del AGR.	24
Figura 2. Gráfico de Desgaste de Agregados Gruesos con superficie en condición SSS, y bajo tiempo de análisis de 10, 20 y 30 minutos.	36
Figura 3. Gráfico de evolución de la resistencia a la compresión.	40
Figura 4. Gráfico de dispersión de medias.	42
Figura 5. Gráfico de caja y bigotes.	44
Figura 6. Gráfico de prueba de Múltiples Rangos, 90% confiabilidad.	47
Figura 7. Resistencia a la compresión en diferentes edades de maduración (1,3 y 7 días).	49
Figura 8. Resistencia a la flexión a los 7 días.	50
Figura 9. Resistencia a la tracción indirecta a diferentes edades de maduración.	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de la caracterización de los agregados	26
Tabla 2. Diseño de mezcla, relación a/c = 0.68 para un metro cúbico, sin ajuste de humedad y absorción.....	28
Tabla 3. Diseño de mezcla, relación a/c = 0.68 para un metro cúbico, con ajuste de humedad y absorción.....	28
Tabla 4. Análisis de desgaste para el AGR en condición S.S.S, con tiempos de 10, 20 y 30 minutos.....	36
Tabla 5. Valores estimados de resistencia la compresión a la edad de "n" días en relación con su resistencia a los 28 días.	38
Tabla 6. Tabla de Medidas de tendencia central y de dispersión.	41
Tabla 7. Tabla de Medidas de forma.	42
Tabla 8. Tabla ANOVA.	45
Tabla 9. Tabla de diferencias significativas entre tratamientos.....	45
Tabla 10. Tabla de grupos estadísticamente homogéneos entre cada par de medias.	46
Tabla 12. Costo de producción por metro cubico de la mezcla de concreto convencional.....	60
Tabla 13. Costo de producción por metro cubico de la mezcla de concreto óptima.	60

RESUMEN

TITULO: DISEÑO OPTIMO Y ANALISIS MECANICO DE UNA MEZCLA DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON AGREGADO RECICLADO.*

AUTORES: CAMACHO JAIMES SILVIA NATHALIA.

SUÁREZ LÓPEZ EDWAR MANUEL.**

PALABRAS CLAVE: Concreto Reciclado, agregado grueso reciclado, diseño de mezcla, compresión, tracción indirecta, flexión, módulo de elasticidad, microscopia SEM.

DESCRIPCIÓN:

Esta investigación consiste en diseñar una mezcla de concreto estructural con agregado grueso reciclado de concreto (AGR), y agregado grueso natural (AGN) óptima a la resistencia a la compresión a los 28 días. El AGR utilizado proviene de desechos de concreto triturado de la compañía de concretos PREVESA SAS. Se realizaron 5 diseños de mezcla con proporciones de AGR de 0, 25, 50, 75 y 100%, complementando con AGN el porcentaje restante de los agregados. El diseño de mezcla óptimo se halló por medio de estadística experimental, se deseaba encontrar un diseño de mezcla que se comportara estadísticamente homogéneo a un concreto convencional con 100% de AGN; y se encontró que la mezcla que no presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a un concreto convencional es la mezcla con porcentaje de 25%AGR, 75% AGN. A este diseño, se le realizó un análisis mecánico de propiedades del concreto en estado endurecido tales como: compresión, tracción indirecta, flexión y módulo de elasticidad, comparando estos resultados con las propiedades mecánicas de un concreto convencional de 100% AGN, obteniendo mejores resultados en el análisis mecánico la mezcla de concreto convencional. Además, se analizó la microestructura y la zona de transición interfacial entre agregado y matriz de cemento de la mezcla optima y la mezcla convencional, por medio de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido SEM.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ingeniero Civil, MSc., M.Eng., PhD.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMAL DESIGN AND MECHANICAL ANALYSIS OF A STRUCTURAL CONCRETE MIX WITH RECYCLED AGGREGATE.*

AUTHOR: CAMACHO JAIMES SILVIA NATHALIA. **

SUÁREZ LÓPEZ EDWAR MANUEL.**

KEYWORDS: Recycled Concrete, recycled coarse aggregate, mix design, compression, indirect traction, flexion, modulus of elasticity, SEM microscopy.

DESCRIPTION:

This research consists in designing a structural concrete mix with recycled coarse concrete aggregate (AGR), and natural coarse aggregate (AGN), which is optimal for 28 days compressive strength. The AGR used, comes from crushed concrete wastes from PREVESA SAS concrete company. Five mix designs were performed with AGR ratios of 0, 25, 50, 75, and 100%, complementing with AGN the remaining percentage of the aggregates. The optimum mix design was found by means of experimental statistic, it was desired to find a mixture design that behaves statistically homogeneous to a conventional concret with 100% of AGN; And it was found that the mixture that does not show statistically significant differences with respect to a conventional concrete is the mix with 25% AGR, 75% AGN. The mechanical analysis of concrete properties in hardened state such as: compression, indirect tensile, flexure and elasticity modulus was performed, comparing these resultswith the mechanical properties of a 100% AGN conventional concrete, obtaining better results in the conventional mechanical analysis mix. In addition, the microstructure and interfacial transition zone between aggregate- cement matrix of the optimum mixture and the conventional mixture were analyzed by means of an optical microscope and scanning electron microscopy SEM.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ingeniero Civil, MSc., M.Eng., PhD.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material hecho por el hombre más utilizado en el mundo desde su invención ^[1]. A medida que la población crece los insumos para generar éste aumentan, como lo hace la demanda de agregados para suplir las necesidades de la sociedad.

Las tendencias actuales de construcción impulsan ciclos de vida de producción lo más cerrados posibles, que sean razonables con el medio ambiente y que actúen de manera óptima con la economía. Un ciclo de vida cerrado consiste en que al partir de un material de primera generación, tras un proceso de transformación se produzca un insumo, pero que agotada su vida útil no se convierta en material de desecho; las tendencias actuales de construcción proponen que tras otro proceso de transformación sea posible generar un material distinto, los llamados materiales de segunda generación, que pueden ser insertados como aporte para otros insumos, o en el mejor de los casos, para la elaboración de la nueva generación del insumo del que provienen, y así, el ciclo de vida de los materiales será más eficiente y acorde con el medio ambiente ^[2]. Desde este punto de vista, el reciclaje de escombros producto de demoliciones es bastante atractivo, debido a que aumenta la vida útil de los rellenos sanitarios y disminuye la explotación de recursos naturales no renovables ^[3].

Este estudio pretende diseñar una mezcla de concreto estructural óptima a la compresión a los 28 días, con AGR por medio de estadística experimental. Se desea encontrar proporciones óptimas entre AGR y AGN tal que este diseño encontrado sea estadísticamente similar u homogéneo a un diseño de mezcla convencional con 100% de AGN. Para llegar a este fin, se van a realizar cinco diseños de mezcla con AGN y AGR en diferentes proporciones de 0, 25, 50, 75 y 100% de AGR, completando el porcentaje restante de agregados con AGN; los cuales se someterán al ensayo a la compresión a los 28 días. Los resultados de las muestras en compresión se van a analizar con estadística experimental, la cual será la

herramienta para hallar la mezcla óptima. Esta mezcla óptima se va a analizar mecánicamente en ensayos de compresión, flexión, tracción indirecta y módulo de elasticidad, en edades de maduración de 3 y 7 días, comparándola de esta manera con una mezcla de concreto convencional. Se van a tomar muestras de cada una de las mezclas y se va a realizar una microscopia óptica y de barrido electrónico SEM, con las cuales se desea observar y analizar más detalladamente la zona interfacial (ZTI) entre agregados y morteros.

Con los resultados obtenidos de laboratorio se desea observar la evolución del comportamiento del concreto en cada una de las proporciones de AGR y AGN, analizando así factores que puedan afectar en los cambios de resistencia y dispersión de datos. Con los dos diseños de mezcla se va a realizar un análisis de costos de material, con el cual se podrá evidenciar la variabilidad de estos respecto al material y proporciones usadas.

1. ESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siendo la industria de la construcción uno de los mayores generadores de desechos en el mundo, debido al ciclo construcción- demolición generado por el hombre debido a remodelaciones, vida útil de las estructuras, cambio de tipo de uso, actualizaciones en la norma, etc; es de vital importancia que esta industria sea amigable con el medio ambiente, generando el menor impacto posible [4]. El reciclaje de escombros de concreto producto de demoliciones es una buena alternativa para disminuir el alto impacto generado por el hombre en la producción de desechos en la tierra.

En Europa la mayoría de países reciclan los escombros producto de demoliciones, en países como Holanda y Finlandia está prohibido el desecho de escombros en rellenos, todos los escombros son pasados por un proceso de selección y tratados para su nuevo uso [5]. Brasil es el primer país latinoamericano que garantiza y promueve la adecuada gestión de escombros; en Colombia se ha implementado su uso sólo como sub-bases viales, aunque en la zona de San Andrés islas, si se ha implementado como concreto estructural, esto, debido al alto costo de transportar agregados hasta allí [6].

Se estima que en Bogotá, Medellín y Cali se puede estar generando más de 20 millones de toneladas de escombros, que son depositados en botaderos [3]. En cuanto a la demanda de agregados se trata, el país está teniendo un gran auge en la construcción, se estima que en el 2013 pudieron haberse producido en Colombia 120 millones de toneladas de agregados para la producción de concreto, siendo la industria minera la más importante en volumen [5].

Todos los actores en la industria de la construcción, desde ingenieros, arquitectos, técnicos, constructores, gobierno y universidades, juegan un papel importante en el direccionamiento hacia el manejo integrado y sostenible del sector. Por ende, la

Universidad Industrial de Santander junto con la empresa de concretos PREVESA SAS, plantean una investigación acerca del uso de escombros producto de demoliciones, al usarse como nuevos agregados en la producción de concreto. La finalidad del proyecto, es analizar el comportamiento mecánico de varios diseños de mezclas, sustituyendo AGN, por AGR proveniente de la trituración de probetas de falla de PREVESA SAS, en distintas proporciones, y en diferentes edades de maduración, con el fin de encontrar a partir de estadística experimental, un diseño de mezcla de concreto estructural óptima a la resistencia a la compresión a los 7 días.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Diseñar y analizar una mezcla de concreto estructural de agregado grueso reciclado, proveniente de la trituración de probetas de la concretera Prevesa S.A.S. Bucaramanga, óptima conforme el ensayo a la compresión uniaxial medida a los 28 días.

2.2 Objetivos Específicos

- Obtener proporciones óptimas entre agregado grueso natural y agregado grueso reciclado utilizando un diseño estadístico de experimentos (multinivel) basado en el ensayo a la compresión uniaxial medida a los 28 días.
- Comparar las propiedades mecánicas (compresión, tracción indirecta, flexión, y módulo de elasticidad, del concreto fabricado con agregado grueso reciclado respecto a un hormigón de agregado grueso natural de características similares, en diferentes edades de maduración (3 y 7 días).
- Analizar los cambios en la microestructura de la interface agregado-matriz, del diseño de mezcla óptima, respecto a una mezcla de concreto con agregado natural, por medio de microscopía electrónica de las zonas de falla entre la matriz de cemento y los agregados.
- Determinar el costo de producción por metro cúbico de la mezcla de concreto con agregado grueso reciclado, y compararlo con el costo de producción de un concreto convencional, de las mismas especificaciones.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

El concreto es un material compuesto por cemento portland, grava, arena y agua, cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. El concreto tiene un peso específico que varía de 2200 hasta 2400 kg/m³ y es el material más empleado en la construcción de edificios, pavimentos y otras estructuras a nivel mundial.

El concreto, por sus características, es el material idóneo para elementos que estén sometidos únicamente a esfuerzos de compresión, pero en eventos externos como sismos, la estructura puede presentar esfuerzos multidireccionales que someten a los elementos de la estructura a compresión y tensión, por consiguiente es ideal reforzar la estructura con acero, además hay una excelente adherencia entre el acero y el concreto, porque la asociación de estos dos materiales, proporciona un sólido único desde el punto de vista mecánico. El concreto, como las piedras naturales, aporta una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión; y las varillas de acero aportan resistencia a los esfuerzos de tracción. De tal forma que en conjunto pueden absorber todo tipo de esfuerzos (compresión, tracción y flexión, etc.) circunstancia que le permite desempeñarse como un gran material estructural [7].

3.1.1 Propiedades del Concreto. El concreto se puede encontrar en estado fresco, en proceso de fraguado o en estado endurecido, y en estos tres

estados presenta características típicas, las cuales determinan su desempeño.

Las propiedades del concreto en estado fresco, que pueden ser determinadas mediante métodos de ensayo son: manejabilidad, segregación, exudación, masa unitaria, contenido de aire, contenido de agua.

En general, las propiedades mecánicas del concreto están gobernadas por la resistencia de la pasta endurecida, los agregados y la interface pasta-agregados, las cuales a su vez son modificadas por los procesos de colocación y condiciones de curado. La resistencia es una habilidad para resistir esfuerzos y de allí que se pueda considerar de cuatro maneras: compresión, tracción, flexión y corte. El concreto presenta una alta resistencia a esfuerzos de compresión y muy poca a los de tracción, razón por la cual, la resistencia a la compresión simple es la propiedad a la que se le da mayor importancia [8].

3.1.2 Concreto con Agregados Reciclados. Recientemente, se han estudiado varios materiales de desecho para ser utilizados en concretos. El uso de agregados reciclados producto de demoliciones, puede consumir grandes cantidades de desechos, ya que este material es el componente principal de morteros y concretos.

Por las presiones económicas y ambientales se considera justificable el uso de concreto reciclado como fuente alternativa de nuevos agregados. No obstante, el concreto reciclado puede tener algunas propiedades diferentes al hecho con agregados naturales, se puede usar para fabricar concretos fuertes y durables con la debida atención en las pruebas de laboratorio, diseño de mezcla, y construcción.

4. FASE EXPERIMENTAL

Esta investigación se desarrolló con el apoyo de la compañía de concretos PREVESA SAS. Localizada en Floridablanca, Santander; quien se interesó en este estudio debido a que desea realizar proyectos de innovación; por lo tanto, todo el material aquí utilizado hace parte de la materia prima comúnmente usada por ellos para su producción.

4.1 Selección y caracterización del material.

Se utilizó AGN y arena proveniente de la planta de agregados AVENSA ubicada en Pescadero, Santander. Cemento de alta resistencia temprana (ART) marca Argos^[9], y AGR extraído de restos de demolición de un pavimento rígido, el cual se trituro por medio de una trituradora de mandíbulas, donde el tamaño máximo del agregado (TMA) fue de 1 pulgada (25.4 mm), ver Imagen 1. Además, se utilizó un aditivo retardante de fraguado y plastificante AD-30 de SIKA^[10].

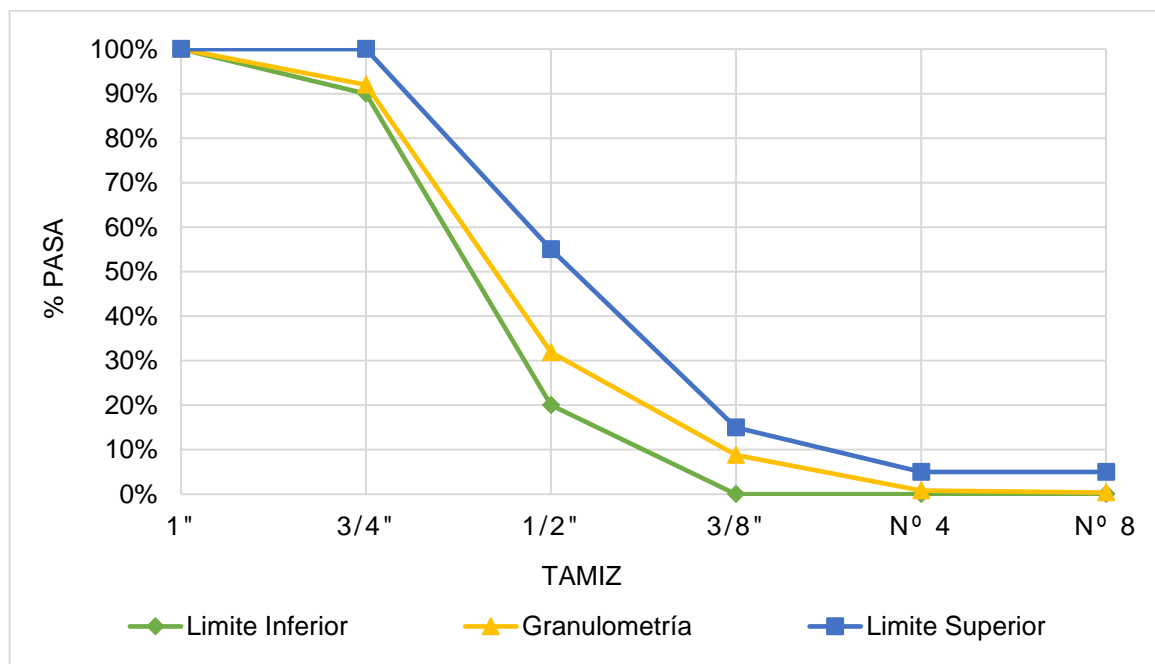
Imagen 1. Material reciclado.



4.1.1 Granulometría. El análisis granulométrico se realizó según la NTC 77 [11], para los agregados finos se tomó una muestra de 500 g y se emplearon los tamices 4.75mm, 2.36mm, 1.18mm, 0.60 mm, 0.30mm, 0.15mm y 0.075mm; para los agregados gruesos, tanto el natural como el reciclado se tomó una muestra de 3 kg de cada uno, se utilizaron de tamices 19.00mm, 12.50 mm, 9.50 mm, 4.75 mm y 2.38mm.

Para seleccionar el AGR triturado y emplearlo en el diseño de mezcla, se realizó la granulometría según la norma NTC 77 [11]; en el primer proceso de tamizado, el porcentaje que pasa de los diversos tamices no se ajustó a la curva granulométrica, hubo alto porcentaje de agregados por encima de $\frac{3}{4}$ de pulgada; por consiguiente, para cumplir con la gradación de la norma, se separó parte del porcentaje de material excedente, y así se logró ajustar el material reciclado a la gradación exigida para proporcionar un buen desempeño en el diseño de mezcla (ver Figura 1). El tamaño máximo del agregado fue de 1 pulgada (25.4 mm), y el tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ pulgada (19.1 mm).

Figura 1. Granulometría del AGR.



4.1.2 Densidad y Absorción. La densidad y absorción del agregado grueso se determinaron siguiendo la norma NTC 176 ^[12]. Para el ensayo se tomaron 3 kg de material en condición saturada superficialmente seca (S.S.S) en el aire y a partir de esta muestra se obtuvo datos de absorción, gravedad específica, gravedad específica aparente y la gravedad específica aparente S.S.S. Para el agregado fino, se siguió la norma NTC 237 ^[13], el ensayo se realizó con una muestra de 0.5 kg, se calculó el módulo de finura, la gravedad específica y la absorción de la muestra, ver Tabla 1.

4.1.3 Masas Unitarias. Las masas unitarias o densidad volumétrica necesaria para las proporciones de los agregados en las mezclas de concreto se calcularon de acuerdo a la NTC 92 ^[14], ver Tabla 1.

4.1.4 Contenido de Materia Orgánica. El contenido de materia orgánica en el agregado fino es importante debido a que el material debe estar libre de impurezas orgánicas para evitar alteraciones en la resistencia del concreto, este análisis se determinó usando la NTC 127 ^[15].

4.1.5 Desgaste de agregados gruesos. El porcentaje de desgaste de agregados gruesos natural y reciclado, se realizó en la máquina de los Ángeles, siguiendo la norma NTC 98 ^[16], con un número de esferas igual a 11 de acuerdo a la gradación usada y duración del ensayo de 15 minutos.

Para conocer el comportamiento de desgaste del AGR en la mezcladora, simulando tiempos y condiciones de humedad, se realizó un ensayo de desgaste extra de los agregados gruesos. Se tomaron 5kg de AGR y AGN, se dejó 24 horas en agua, se secó superficialmente con un paño

hasta que dejara de gotear y se realizó el laboratorio de desgaste en la máquina de Los Ángeles según su granulometría. Los tiempos de análisis fueron 10, 20 y 30 minutos. Los resultados de este análisis por ser más profundo, se encuentran en la sección de análisis de resultados (ver Figura 1). La caracterización de los agregados se encuentra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la caracterización de los agregados

AGREGADO	Fino	Grueso Natural	Grueso Reciclado
Tamaño Máximo del Agregado	-----	1" (25.4 mm)	1" (25.4 mm)
Tamaño Máximo Nominal	-----	3/4" (19.1 mm)	3/4" (19.1 mm)
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1488.3	1431.1	1223.8
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1547.1	1491.3	1370.8
Densidad específica (kg/m ³)	2630	2600	2643
Módulo de finura	2.85	-----	-----
Porcentaje de absorción (%)	0.6	0.8	6

Las propiedades de cemento, agua y aditivos, se observan a continuación:

- Cemento estructural Argos tipo ART (Alta Resistencia Temprana).
Peso específico 3130 kg/m³ [9].
- Agua de la red pública.
Peso específico 1000 kg/m³ [17].
- Aditivo AD-30 de SIKA, Densidad = 1.3 (ml/1% Aire-100 kg cemento) [10].

4.2 Diseño de mezcla

La caracterización de materiales tiene como fin primordial conocer las propiedades de los materiales que van a afectar mecánicamente el desempeño del concreto en el diseño de mezcla, para determinar sus cantidades en peso y volumen a mezclar, se siguió el procedimiento dado en la norma ACI 211 ^[18].

Para conocer los materiales y sus reacciones, se realizó una serie de mezclas con 100% de AGR y 100% de AGN, se agregó aditivo curador y plastificante AD-30 de Sika ^[10], y se seleccionó una relación agua- cemento (a/c) igual a 0.45. De estas mezclas se observó que no hubo buena fluidez y el resultado de resistencia a la compresión ^[19] a los 3 días fue superior a 4600 psi; de acuerdo a que la investigación es enfocada en resistencias a compresión a los 28 días entre 3000 y 4000 psi, estos resultados salían del rango de estudio; por lo tanto, se decidió bajar la cantidad de pasta cementante, y después de varias pruebas se definió una relación $a/c = 0.68$. Además, se decidió suspender el uso de aditivo AD-30, esto debido a que se deseaba analizar el comportamiento entre los agregados y la nueva relación a/c, adicionalmente se temía que el AGR absorbiera el aditivo, y no le permitiera desempeñarse como se esperaba en la pasta cementante.

El AGN contenido en el diseño de mezclas de control, fue reemplazado por AGR en proporciones de 0, 25, 50, 75 y 100% (en masa), como lo muestran las Tablas 2 y 3, a fin de obtener cambios en el comportamiento del concreto al realizar esta sustitución. En la Tabla 2, se encuentra el diseño de mezcla definitivo sin ajuste de humedad y absorción y en la Tabla 3, se encuentra con su respectivo ajuste.

4.2.1 Ensayo de laboratorio para concreto en estado fresco.

Asentamiento. Es una medida de la consistencia del concreto, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, esto indica que tan seca o fluida esta cuando se encuentra en estado plástico ^[20]. Este ensayo se realiza con el Cono de Abrams, según la norma NTC 396 ^[21].

Tabla 2. Diseño de mezcla, relación a/c = 0.68 para un metro cúbico, sin ajuste de humedad y absorción.

Agregado Reciclado (%)	Materiales (kg/m ³)				
	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso Natural	Agregado Grueso Reciclado
0	204.0	300.0	861.1	917.1	0.0
25	204.0	300.0	883.3	687.9	210.8
50	204.0	300.0	905.5	458.6	421.5
75	204.0	300.0	927.7	229.3	632.3
100	204.0	300.0	949.9	0.0	843.0

Tabla 3. Diseño de mezcla, relación a/c = 0.68 para un metro cúbico, con ajuste de humedad y absorción.

Agregado Reciclado (%)	Materiales (kg/m ³)				
	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso Natural	Agregado Grueso Reciclado
0	156.0	300.0	912.7	926.3	0.0
25	145.0	300.0	953.9	694.7	211.7
50	175.0	300.0	954.2	463.2	423.4
75	176.0	300.0	983.4	231.6	635.1
100	168.4	300.0	1021.2	0.0	846.8

4.3 Análisis Mecánico. Los ensayos de análisis mecánico se desarrollaron para el diseño de mezcla con 100% de AGN y para el diseño de mezcla óptima que se obtuvo por estadística experimental (Etapa 2), después de probar con mezclas de diferentes proporciones de AGR y AGN.

Los ensayos de análisis mecánico, realizados para los diseños de mezcla elaborados fueron:

- Resistencia a la Compresión (NTC 673) [19].
- Resistencia a la Flexión (NTC 2871) [22].
- Tracción Indirecta (NTC 722) [23].
- Módulo de elasticidad (NTC 4025) [24].

4.3.1 Ensayo de Resistencia a la compresión. La gran mayoría de las estructuras en concreto están diseñadas bajo la suposición que este resiste únicamente esfuerzos de compresión. Para propósitos de diseño estructural, la resistencia a la compresión es el criterio de calidad más importante [25].

El procedimiento de elaboración y ensayo de especímenes se realizó siguiendo las normas NTC 550 [26] y NTC 673 [19], los cuales fueron cilindros de falla con dimensiones de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, ver Imagen 2.

Imagen 2. Cilindros de falla a la compresión a los 28 días de 100mm de diámetro por 200 mm de altura.



Este ensayo se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro, a una velocidad específica mientras ocurre la falla, ver Imagen 3. Este ensayo se realizó en las dos etapas de la investigación, en la primera etapa (diseño de mezclas con diferentes proporciones de AGR y AGN). En la segunda etapa (análisis mecánico del diseño de mezcla óptimo a la compresión a los 28 días).

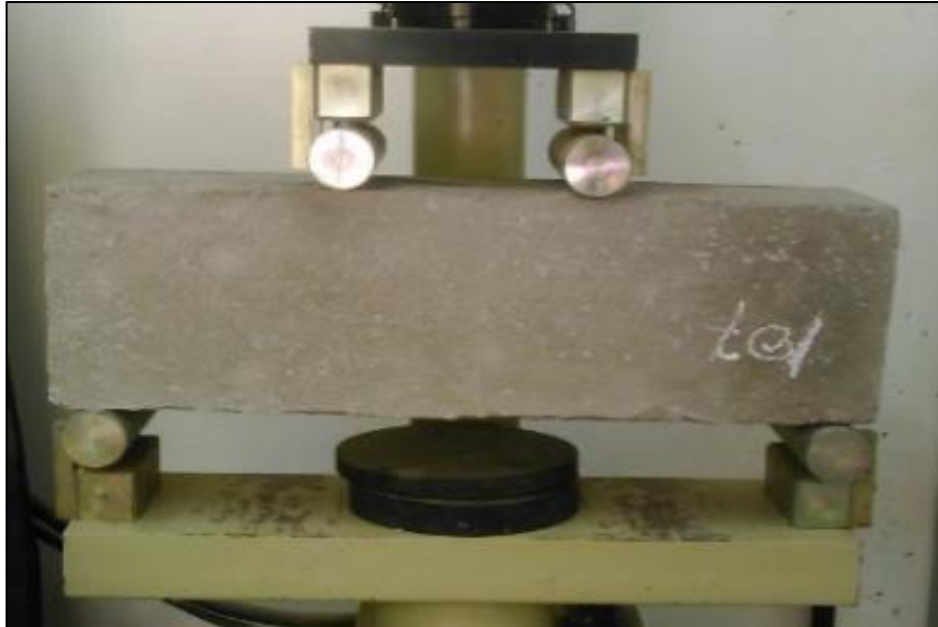
Imagen 3. Ensayo de compresión a los 28 días.



Este ensayo se realizó en las dos etapas de la investigación, en la primera etapa (diseño de mezclas con diferentes proporciones de AGR y AGN) se fallaron cilindros para 1, 3, y 7 días (3 cilindros por día), para los 28 días se fallaron 32 cilindros por cada proporción. En la segunda etapa (análisis mecánico del diseño de mezcla óptimo) se fallaron 24 cilindros extra a 3 y 7 días del diseño de mezcla escogido por estadística experimental, al igual que para la mezcla de 100% de AGN.

4.3.2 Ensayo de Resistencia a Flexión. Los elementos sometidos a flexión tienen una zona sometida a compresión y otra en la que predominan los esfuerzos a tracción, este factor es importante para estructuras en concreto simple [27].

Imagen 4. Ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión.



Este ensayo se realizó para el diseño de mezcla óptima obtenido por estadística en la segunda etapa de la investigación, y para la mezcla de 100% de AGN (muestra de control). Se realizaron vigas de 150x150x500 mm [26], para ser ensayadas a 7 días. La norma NTC 2871 [22] describe el proceso de este ensayo para una viga cargada en los tercios de la luz. La resistencia a la flexión se expresa como el módulo de rotura (MR) en MPa y se calculó por medio de la Ecuación (1).

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

Dónde: MR= Modulo de rotura, MPa; P= Máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo, N; L= Distancia entre apoyos, mm; b= Ancho

promedio de la probeta en la fractura, mm y d = Altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm ^[22].

4.3.3 Ensayo de Resistencia a tracción indirecta. La tracción tiene que ver con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tracción ^[23].

Este ensayo se elaboró según la norma NTC 722 ^[23]. Consiste en cargar a compresión un cilindro convencional, a lo largo de dos líneas axiales diametralmente opuestas a través de listones de apoyo de 3 mm de espesor, 25 mm de ancho y la longitud que tenga el cilindro, ver Imagen 5. Las láminas de apoyo distribuyen la carga sobre un ancho pequeño suficiente para evitar concentraciones de carga indebidas, de tal manera que la fuerza de compresión induce un esfuerzo de tracción. Si la resistencia a compresión es mínimo 3 veces la resistencia a tracción, como normalmente sucede en el concreto ^[27], se produce la falla en sentido vertical en la sección transversal y la resistencia a la tracción se calcula por medio de la Ecuación (2).

$$F_{ct} = \frac{2P}{\pi L d} \quad (2)$$

Dónde: F_{ct} =Resistencia a la tracción indirecta en MPa, P =Carga máxima aplicada en N, L = Longitud del cilindro en mm y d = diámetro en mm ^[23].

Se realizaron cilindros de falla con dimensiones de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura para edades del concreto de 3 y 7 días. En la Imagen 6 se puede observar la falla horizontal de un cilindro fallado en este ensayo.

Imagen 5. Ensayo de tracción indirecta.



Imagen 6. Cilindro fallado a tensión indirecta.



4.3.4 Ensayo de Modulo de Elasticidad. Se determina de acuerdo a la norma NTC 4025 ^[24], con cilindros de falla de dimensiones de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura para edad del concreto de 7 días. A los

cilindros se les adopta un dispositivo en forma de corona que tiene un deformímetro vertical. La velocidad de carga es la misma que se aplica en el ensayo de compresión, para no dañar el dispositivo por exceso de deformación, se debe aplicar carga hasta el 40% de la resistencia a la compresión [27]. En la Imagen 7-a se puede apreciar el espécimen en el cabeceador de plato fijo, en la Imagen 7-b se puede ver el indicador de cuadrante para medir la deformación.

Imagen 7. Equipo para el módulo de elasticidad (a) espécimen 150 x 300 mm en el cabeceador de plato fijo, (b) Indicador de cuadrante para medir la deformación.



4.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La microscopia electrónica de barrido SEM (scanning electron microscopy), se basa en el principio de microscopia óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Con esto se consigue una resolución de hasta 100 Angstroms, la cual es muy superior a cualquier elemento de microscopia óptica [28].

El procedimiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra. Esta muestra salvo que sea conductora, esta generalmente cubierta con

una capa muy fina de oro o carbón, lo que le otorga propiedades conductoras; esta técnica se denomina “sputtering”. Al alcanzar la superficie de la muestra, se puede observar su microestructura, fases cristalinas, impurezas, detección e identificación de sales y microfisuración [28].

Los ensayos se realizaron en laboratorio de microscopia de la UIS, con el equipo Quanta 650 FEG ambiental y amplificación de la imagen hasta de 1000x y tamaño máximo de las muestras de concreto de 10 mm, en el numeral 3.5 se encuentra el registro fotográfico y su respectiva descripción.

4.5 Análisis de microscopia óptica

La interface entre los agregados y la matriz de cemento también se observó con el equipo de microscopia óptica (OLYMPUES GX-AN360) de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales UIS. Se tomaron muestras de los cilindros de falla a compresión, se cortaron muestras de 10x10x30 mm aproximadamente y se pasaron por un proceso de pulido, que consiste en lijar las caras de las muestras hasta obtener una superficie lisa para ser analizada en microscopio.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

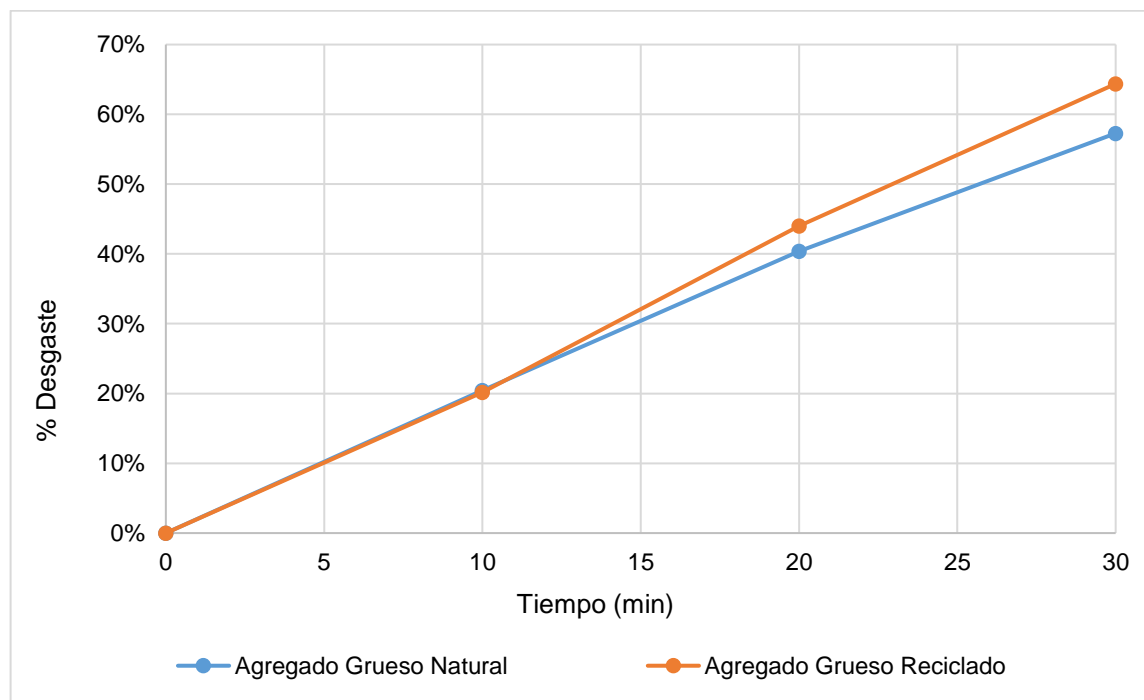
5.1 Análisis de desgaste de AGR y AGN en condición S.S.S

Los tiempos de ambos materiales en la máquina de los Ángeles fueron de 10, 20 y 30 minutos, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4 y en la Figura 2.

Tabla 4. Análisis de desgaste para el AGR en condición S.S.S, con tiempos de 10, 20 y 30 minutos.

Tiempo (min)	0	10	20	30
%Desgaste AGN	0.00%	20.15%	40.40%	57.28%
%Desgaste AGR	0.00%	20.45%	43.99%	64.37%

Figura 2. Gráfico de Desgaste de Agregados Gruesos con superficie en condición SSS, y bajo tiempo de análisis de 10, 20 y 30 minutos.



De la Figura 2 y la Tabla 4 se puede inferir que el material que presenta mayor porcentaje de desgaste es el AGR, con el paso del tiempo presenta un crecimiento

lineal en la diferencia de desgaste respecto al AGN. A los 10 minutos presentan una diferencia de desgaste del 0.30%, a los 20 minutos la diferencia de desgaste es de 3.59% y a los 30 minutos la diferencia es del 7.09%; por lo tanto por cada 10 minutos de mezclado se incrementa el porcentaje de desgaste en un 3.50% aproximadamente. Esto es debido a que el AGR está recubierto por una capa de mortero reciclado, que al recibir impactos, va a tener mayor desgaste que un AGN, en el que su superficie y su interior tienen resistencia de roca natural.

5.2 Curvas de evolución de resistencia a la compresión para diseños de mezcla con 0, 25, 50, 75 y 100 % de AGR.

Como se ha dicho en el desarrollo del artículo, el cemento utilizado para esta investigación, fue un cemento de Alta Resistencia Temprana (ART) ^[9]. Según la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso de endurecimiento del concreto, es muy difícil predecir la resistencia de este a edades muy tempranas.

El Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Valencia, en su documento de clase “Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura” ^[29] proporciona unos porcentajes estimados de resistencia a la compresión en la edad de "n" días, en relación con su resistencia a los 28 días, tal como lo muestra la Tabla 5.

Para este estudio se debe tener en cuenta la tercera columna de la Tabla 5, por tratarse de un hormigón de endurecimiento rápido. El porcentaje de resistencia respecto a 28 días que se puede predecir en 3 días es del 55%, para 7 días, un porcentaje de 75%, y para los 28 días se alcanzará el 100% de resistencia de la mezcla de diseño.

Tabla 5. Valores estimados de resistencia a la compresión a la edad de "n" días en relación con su resistencia a los 28 días.

Edad del hormigón (Días)	Hormigones de endurecimiento normal	Hormigones de endurecimiento rápido
3	40%	55%
7	65%	75%
28	100%	100%
90	120%	115%
360	135%	120%

Fuente: "Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura" [29].

En la Figura 3, se muestra la evolución de la resistencia a la compresión a los 28 días, de cada una de las mezclas realizadas. Para facilitar la nomenclatura en gráficos y en el desarrollo de este artículo, se van a identificar cada una de las mezclas realizadas con unas siglas específicas:

- M0= Mezcla de 0% de AGR, 100% de AGN
- M25= Mezcla de 25% de AGR, 75% de AGN
- M50= Mezcla de 50% de AGR, 50% de AGN
- M75= Mezcla de 75% de AGR, 25% de AGN
- M100= Mezcla de 100% de AGR, 0% de AGN

Las mezclas con alto porcentaje de AGR y bajo porcentaje de este, se comportaron de la misma manera; a un día de curado, se obtuvieron resistencias de aproximadamente el 35% de la resistencia de diseño (21 MPa); a un día de curado la mezcla M0 alcanzó una evolución de 47,8%, la mezcla M25, del 40%, la mezcla M50 del 34%, M75 del 32%, y la mezcla M100 del 30%; se puede inferir de esto, que a medida que se agregó más porcentaje de AGR bajó el porcentaje de evolución de resistencia a un día. Esto demuestra que la granulometría de los agregados gruesos, la textura, forma y porosidad intervienen en el proceso de evolución de la resistencia.

Una buena granulometría permite en estado fresco la máxima capacidad del concreto, y en estado endurecido una mayor densidad, que se traduce en mayor resistencia. La granulometría del AGR, como se dijo anteriormente hubo que modificarla, debido a que al triturar este material su granulometría no cumplió con la norma NTC 77 [11]. Puede haber variaciones en el proceso de ajuste de granulometría, o también que la pasta de cemento nueva no tenga buena adherencia con la pasta antigua debido a procesos químicos [30].

Por otro lado, en el proceso de trituración se pueden generar microfisuras que pueden llegar a propagarse en las zonas de transición interfacial (ZTI) entre el mortero y los agregados, microfisuras que en el proceso de mezclado pueden aumentar y con estas fisuras, más la porosidad propia del AGR puede irse más agua de la que se tenía prevista, perdiendo así agua que reaccione con la pasta de cemento, aumentando así el contenido de aire atrapado previsto, presentando discontinuidades del material que inducen a la falla [30].

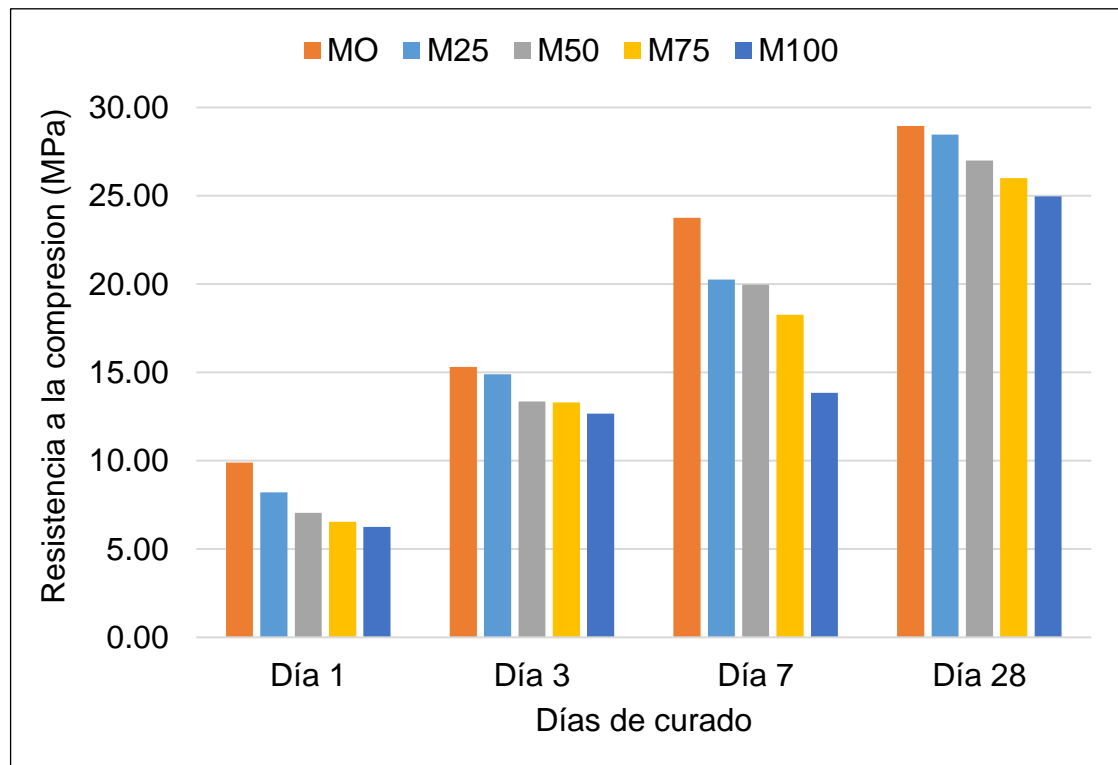
A los 3 días, todas las mezclas aumentaron su resistencia sobre un 60%, y de igual manera que en el comportamiento a un día, aumenta más la resistencia en las mezclas con bajo porcentaje de AGR, que en las que lo tienen elevado (ver Figura 3).

A los 7 días, la mezcla M0, supero los 21 MPa, mientras que las otras evolucionaron en menor porcentaje, la mezcla M100 cumplió con las predicciones dadas en la Tabla 3, a 7 días alcanzo una evolución del 66% de la resistencia estimada.

A los 28 días todas las mezclas superaron la resistencia de diseño, las mezclas M0 y M25 alcanzaron los 28 MPa, la mezcla M100 alcanzo los 25 MPa; se puede inferir de esto, que a medida que se agregó más porcentaje de AGR bajó la resistencia a compresión, debido a la porosidad que posee el agregado reciclado, las microfisuras del AGR en el proceso de trituración. También se puede variar las resistencias por la falta de cohesión entre el AGR y la pasta cementante.

De las resistencias tan altas, se puede inferir que estos resultados son debidos al tipo de cemento utilizado. Por ser un cemento de alta resistencia temprana, dará resistencias a los 3 días aproximadamente igual a la resistencia a compresión a los 7 días para los tipo I y II, y una resistencia a los 7 días casi igual a la resistencia a compresión a los 28 días para los tipo I y II. La resistencia ultima si es más o menos la misma que la del cemento portland Tipo I. Este cemento se diferencia en tener partículas más finas, y un porcentaje elevado de Silicato Tricálcico (C₃S) y Aluminato Tricálcico (C₃A) [31].

Figura 3. Gráfico de evolución de la resistencia a la compresión.



5.3 Análisis estadístico para encontrar diseño de mezcla óptimo de AGR y AGN a la compresión a los 28 días

Con ayuda del software estadístico STATGRAPHICS Centurion® [32], se realizó el análisis experimental de la investigación. Se calcularon medidas de tendencia central, de dispersión, de forma, se realizó Análisis de Varianza ANOVA y la prueba de rangos múltiples con porcentaje y confiabilidad de Tukey del 90%.

5.3.1 Medidas de tendencia central, de dispersión y de forma. Se obtuvo 32 datos de resistencias a la compresión a los 28 días, para cada uno de los 5 diseños de mezcla realizados, con 0, 25, 50, 75 y 100% de AGN y AGR respectivamente. Se calcularon medidas de tendencia central como promedio y mediana, medidas de dispersión como desviación estándar y coeficiente de variación y medidas de forma, como rango, sesgo estandarizado y coeficiente de curtosis, estas para cada uno de los tratamientos llevados a cabo en el experimento, tal como lo muestran las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Tabla de Medidas de tendencia central y de dispersión.

Mezcla	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
M0	32	29.792	3.102	10.412%
M25	32	28.908	1.386	4.793%
M50	32	27.401	1.085	3.958%
M75	32	26.218	2.423	9.242%
M100	32	25.343	1.810	7.143%
Total	160	27.533	2.643	9.601%

Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

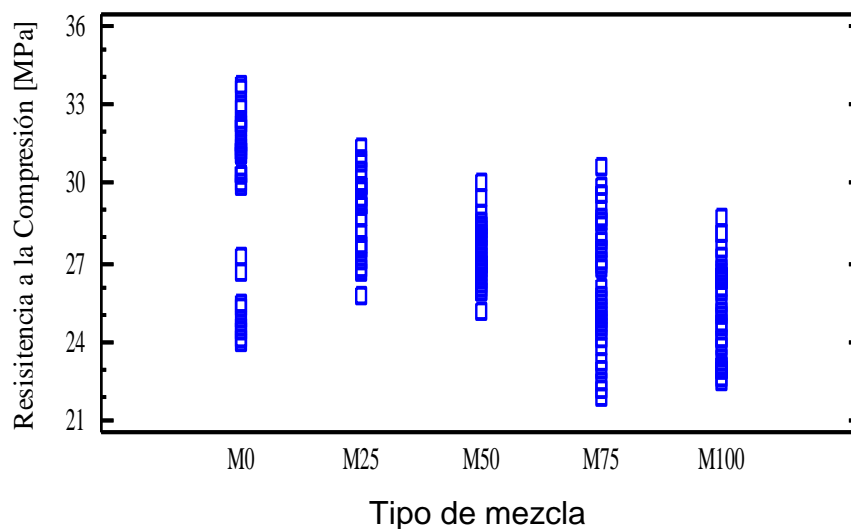
Tabla 7. Tabla de Medidas de forma.

Mezcla	Mínimo	Máximo	Rango	Curtosis Estandarizada	Sesgo Estandarizado
M0	24.008	33.774	9.766	-0.931	-1.866
M25	25.721	31.312	5.591	-0.599	-0.990
M50	25.246	30.024	4.777	-0.030	0.707
M75	21.921	30.601	8.680	-1.151	-0.028
M100	22.462	28.765	6.303	-1.274	-0.075
Total	21.921	33.774	11.854	-1.362	0.319

Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

Observando los resultados de las desviaciones estándar, coeficiente de variación y el rango de cada tratamiento en las Tablas 6 y 7, se puede concluir que los datos más dispersos respecto a la media fueron los de la mezcla M0 con coeficiente de variación de 10.41%, seguidos del diseño M75 con coeficiente de variación de 9.245%. El diseño que tuvo menor dispersión de los datos respecto a la media fue el M50, con coeficiente de variación de 3.9%. Estos comportamientos se pueden evidenciar en el gráfico de dispersión según la Figura 4.

Figura 4. Gráfico de dispersión de medias.



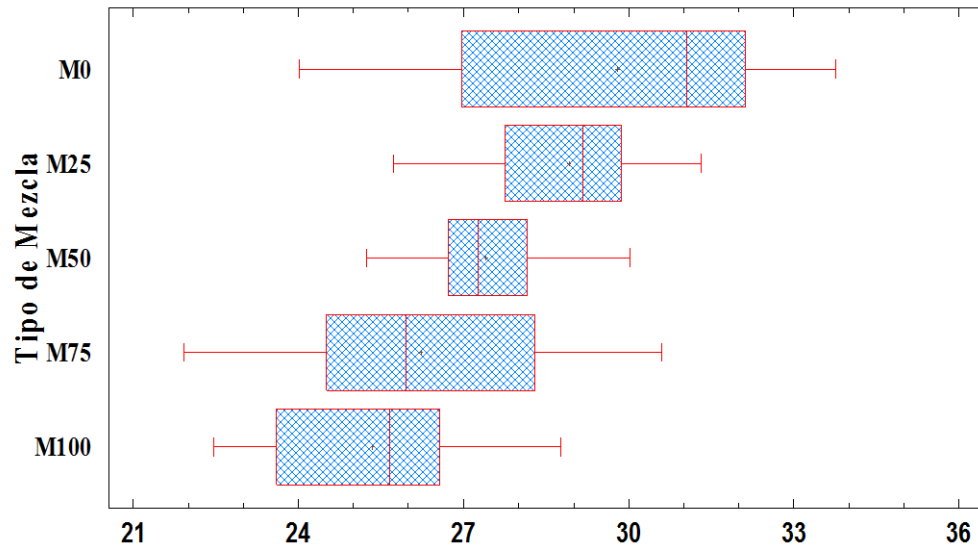
Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

Además se analizó el sesgo y la curtosis estandarizada, que son medidas que indican que tan simétricos son los datos obtenidos respecto a su media aritmética, sin necesidad de hacer representación gráfica, indican si hay el mismo número de elementos a izquierda y derecha de la media. Según la Tabla 7, se puede observar que todos los tratamientos están en el rango de -2 a +2, y por esto se puede inferir que todas las muestras provienen de una distribución normal, y ninguna presenta desviaciones significativas de normalidad.

La mezcla M50 es el tratamiento que es más simétrico respecto a su media por que presentó el menor valor de curtosis estandarizada de -0.03, esto se afirma en la Figura 4, en la que en la tercera columna M50, se ve la distribución de los datos menos dispersos, los cuales tienen la menor diferencia entre valores máximos y mínimos de resistencia. Experimentalmente se puede afirmar que la temperatura y el asentamiento son propiedades del concreto fresco que tienen que ver con la homogeneidad entre dos batidas de la misma mezcla, y en este caso estas dos propiedades pueden ser las causantes de la mejor dispersión de los datos en la mezcla.

Los resultados de la Tabla 7 se pueden interpretar mejor en el gráfico de Caja y Bigotes, que se muestra en la Figura 5. En este diagrama se muestra el dato mínimo, el máximo, los cuartiles inferior y superior (el percentil 25 y el percentil 75, respectivamente) y la mediana (percentil 50) en una caja rectangular alineada horizontal o verticalmente³¹. La línea roja representa la media, y el punto central la mediana, al observar la línea roja de la mezcla M75 y M100, se puede notar que son valores de resistencia muy similares.

Figura 5. Gráfico de caja y bigotes.



Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

5.3.2 Análisis de Varianza (ANOVA). Se realiza la prueba de Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 90%, la cual es empleada para probar la hipótesis nula que afirma que las medias de cada una de las poblaciones (cada tipo de mezcla) son iguales; esta prueba permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias significativas, o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren entre sí [33].

En la Tabla 8 se puede observar que ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 24.77, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.1, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 90% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizó la Prueba de Múltiples Rangos [34].

Tabla 8. Tabla ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	433.105	4	108.276	24.760	0
Intra grupos	677.889	155	4.373		
Total (Corr.)	1110.99	159			

Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

5.3.3 Prueba de Múltiples Rangos. Esta prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 9 muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra en la segunda columna, indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 90% de confianza.

Tabla 9. Tabla de diferencias significativas entre tratamientos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
M0 - M25		0.884	1.298
M0 - M50	*	2.391	1.298
M0 - M75	*	3.574	1.298
M0 - M100	*	4.449	1.298
M25 - M50	*	1.507	1.298
M25 - M75	*	2.690	1.298
M25 - M100	*	3.564	1.298
M50 - M75		1.183	1.298
M50 - M100	*	2.058	1.298
M75 - M100		0.875	1.298

*Indica una diferencia significativa.

Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

En la Tabla 10, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de Diferencia Honestamente Significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 10% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0 [34].

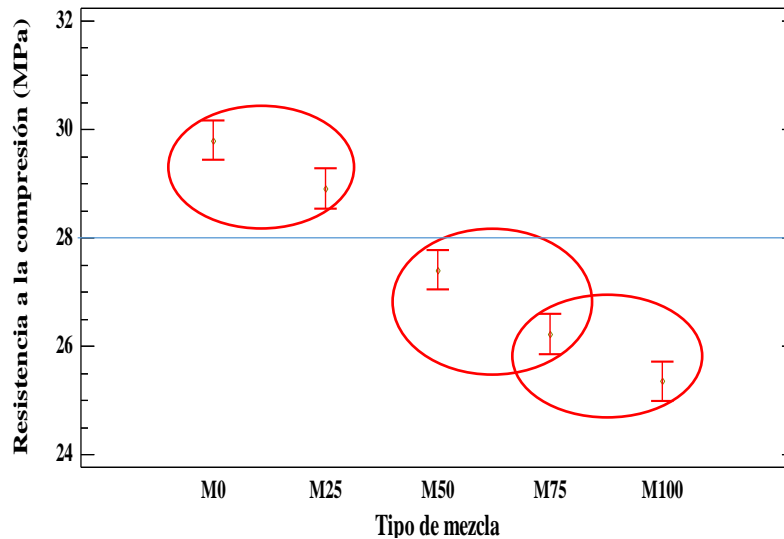
Tabla 10. Tabla de grupos estadísticamente homogéneos entre cada par de medias.

Mezcla	Casos	Media	Grupos Homogéneos
M100	32	25.343	X
M75	32	26.218	X X
M50	32	27.401	X
M25	32	28.908	X
M0	32	29.792	X

Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

En la Figura 6, se puede notar el comportamiento de los 2 grupos homogéneos nombrados anteriormente, el círculo rojo muestra gráficamente que no hay diferencia estadísticamente significativa en la mezcla M0 y M25, y así, de esta manera se comportan de forma similar, las mezclas M50- M75, y M75- M100.

Figura 6. Gráfico de prueba de Múltiples Rangos, 90% confiabilidad.



Fuente: Software STATGRAPHICS® [32].

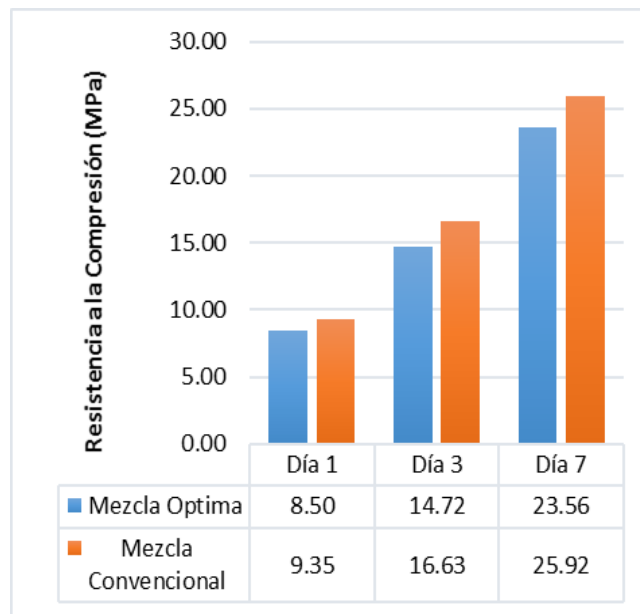
Según los resultados obtenidos en el análisis de experimentos, se tiene que la mezcla que se comporta de manera similar a un diseño de mezcla convencional (100% AGN), es la mezcla M25 (25% AGR, 75% AGN), este diseño no presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a la mezcla M0 (0% AGR, 100% AGN), por lo tanto, este es el diseño de mezcla escogido como diseño de mezcla con AGR óptimo a la resistencia a los 28 días. El diseño de esta mezcla para un m^3 de concreto (sin ajuste de absorción y humedad) es: 204 Kg/m^3 de agua, 300 Kg/m^3 de cemento, 883.3 Kg/m^3 de arena, 678.9 Kg/m^3 de AGN y 210.8 Kg/m^3 de AGR.

5.4 Análisis mecánico de mezcla óptima de AGR a los 7 días y de una mezcla de concreto convencional de AGN.

5.4.1 Análisis de mezclas sometidas a compresión. La resistencia a la compresión de la mezcla óptima respecto a la mezcla convencional en las diferentes edades de maduración 1, 3 y 7 días, se puede observar en la Figura 7, donde se mantienen mayores los resultados de la mezcla convencional de 100% de AGN.

La resistencia a la compresión a los 7 días de curado de ambos diseños de mezcla, superó la resistencia de diseño (21 MPa). En la edad de 3 días, la mezcla de concreto convencional alcanza el 79.2% de la resistencia de diseño y la mezcla de concreto óptima un 70% alcanzando un buen desempeño. En el primer día de fraguado, la mezcla convencional alcanzo un 44.5% de la resistencia de diseño y la mezcla óptima un 40.3%. Estos resultados confirman una vez más que las mezclas M0 y M25 son homogéneas y tienen un comportamiento mecánico similar, el rango de evolución es parecido y el 25% de AGR que hay en la mezcla realiza su efecto sobre el concreto, ya sea por la porosidad de su superficie, por las microfisuras propagadas en el proceso de trituración o por adherencia entre capas de mortero antiguo y nuevo.

Figura 7. Resistencia a la compresión en diferentes edades de maduración (1,3 y 7 días).

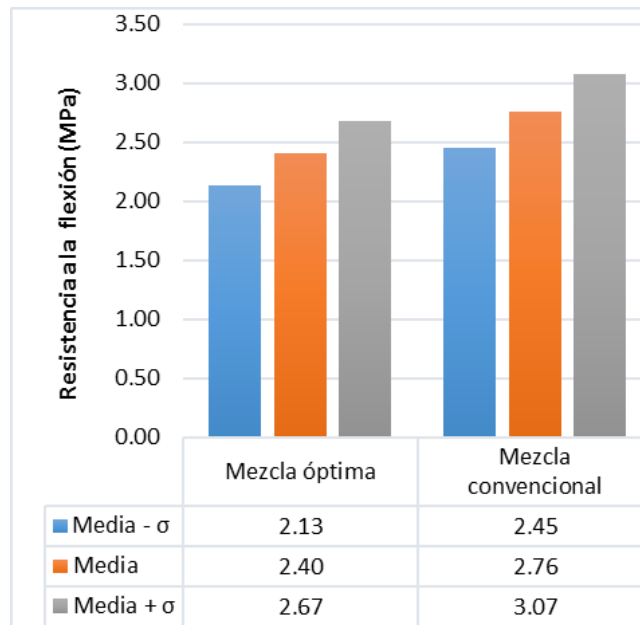


5.4.2 Análisis de mezclas sometidas a flexión. Según la norma NSR-10, en el numeral C.10.2.5 ^[35], el módulo de rotura varía entre el 10 a 15% de la resistencia a la compresión. Esta información se puede chequear en ensayos de mezclas de concreto convencionales comparadas con la mezcla óptima de AGR. En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos, donde los valores de Módulo de Rotura a los 7 días ya son superiores al 10% de la resistencia a la compresión (2.1 MPa). También se puede apreciar el rango de dispersión de las resistencias.

Según la Especificación IDU-ET 2005-2006 sobre Pavimentos de Losas de Concreto Hidráulico ^[36], se exige que el módulo de rotura debe estar en el rango mínimo de 4.0 a 4.5 MPa, relación a/c máximo de 0.49 y cantidad mínima de cemento de 300 kg/m³. Existe la posibilidad de utilizar concretos reciclados para pavimentos, pero estos, generalmente tienen un asentamiento de ½ a 2 ½ pulgadas; en estas muestras no se puede afirmar que el diseño de mezcla óptima o de 100% AGN funcione, por tener un asentamiento de 6 pulgadas; en cuanto a relación a/c, el diseño de mezcla

óptima tampoco lo cumple (relación a/c= 0.68); el contenido de cemento mínimo es el único requisito que cumple el diseño de mezcla realizado. Es importante hacer una investigación más profunda sobre esta área con agregados reciclados de concreto, y así no generar tan altas tasas de desechos, evitando a su vez la necesidad de explotación excesiva de material natural pétreo.

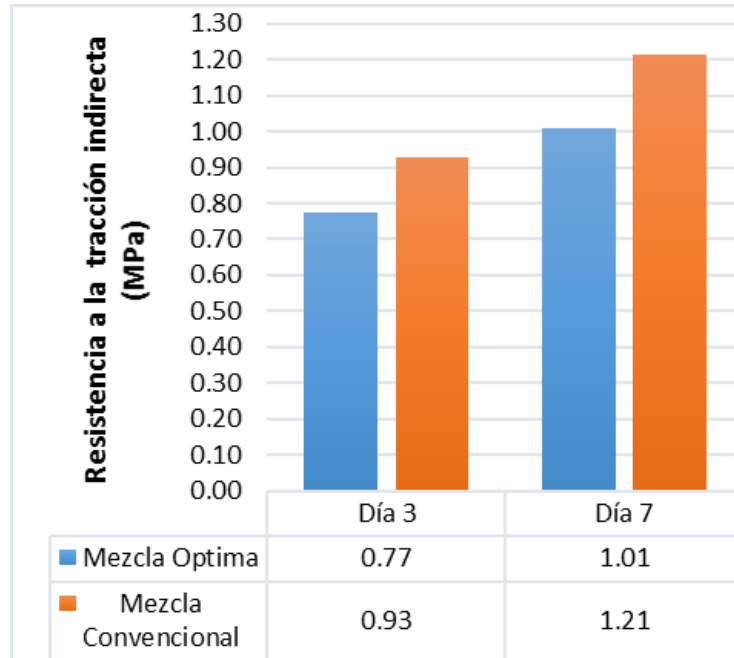
Figura 8. Resistencia a la flexión a los 7 días.



5.4.3 Análisis de mezclas sometidas a tracción indirecta. La Figura 9 muestra los resultados de esfuerzo de los especímenes sometidos a tracción indirecta, a los 7 días la mezcla convencional obtuvo un esfuerzo que supera cerca de un 20% la mezcla óptima.

Continuando con la Especificación IDU-ET 2005-2006 sobre Pavimentos de Losas de Concreto Hidráulico ^[34], se requiere que la resistencia a la tracción indirecta a los 28 días, en porcentaje mínimo de resistencia la flexión a los 28 días sea del 50%; los valores de resistencia a la flexión que se tienen de la mezcla óptima o de 100% AGN son a 7 días, así que no es posible afirmar que la resistencia a la tracción indirecta si cumple con la especificación.

Figura 9. Resistencia a la tracción indirecta a diferentes edades de maduración.



5.4.4 Módulo de elasticidad de mezclas. Para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto se utilizó el método de la secante, siguiendo el procedimiento de la norma NTC 4025 [24].

De acuerdo con la sección C.8.5 de la NSR-10 [37], para un concreto con densidad normal, el módulo de elasticidad se puede tomar como $E = 4700\sqrt{f'c}$ (MPa). El módulo de elasticidad de la mezcla convencional según la fórmula es 24870 (MPa), para un $f'c = 28$ MPa. El módulo de elasticidad de la mezcla óptima a los 7 días es de 16037 MPa, y de la mezcla convencional 100% AGN es 17567.8 MPa, es claro que no se puede comparar esta propiedad con la norma, pero sí, el dato hallado experimentalmente y entre ellas, por lo tanto, se nota una leve disminución del módulo de elasticidad de la mezcla óptima. Esta disminución puede deberse al porcentaje de pasta endurecida adherida al AGR, generando así la disminución de su calidad, evidenciada en el mayor porcentaje de desgaste respecto al AGN (ver Figura 2) [30].

5.5 Análisis de la microestructura de la interface agregado-matriz por medio de microscopia electrónica SEM

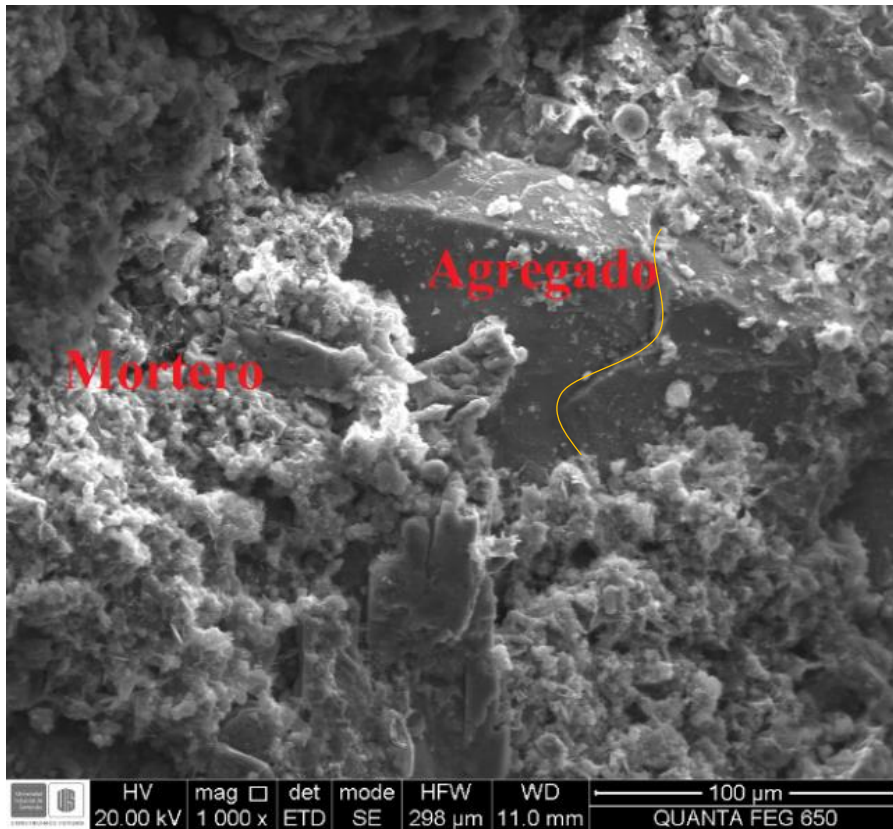
La microestructura y la morfología de los agregados se estudiaron mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy). En la Imagen 8, se pueden observar las muestras de concreto después del proceso de recubrimiento con carbono, el cual le da una coloración oscura a la superficie para ser analizadas en el equipo Quanta 650 FEG ambiental, del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Imagen 8. Muestras de concreto recubiertas de carbono.



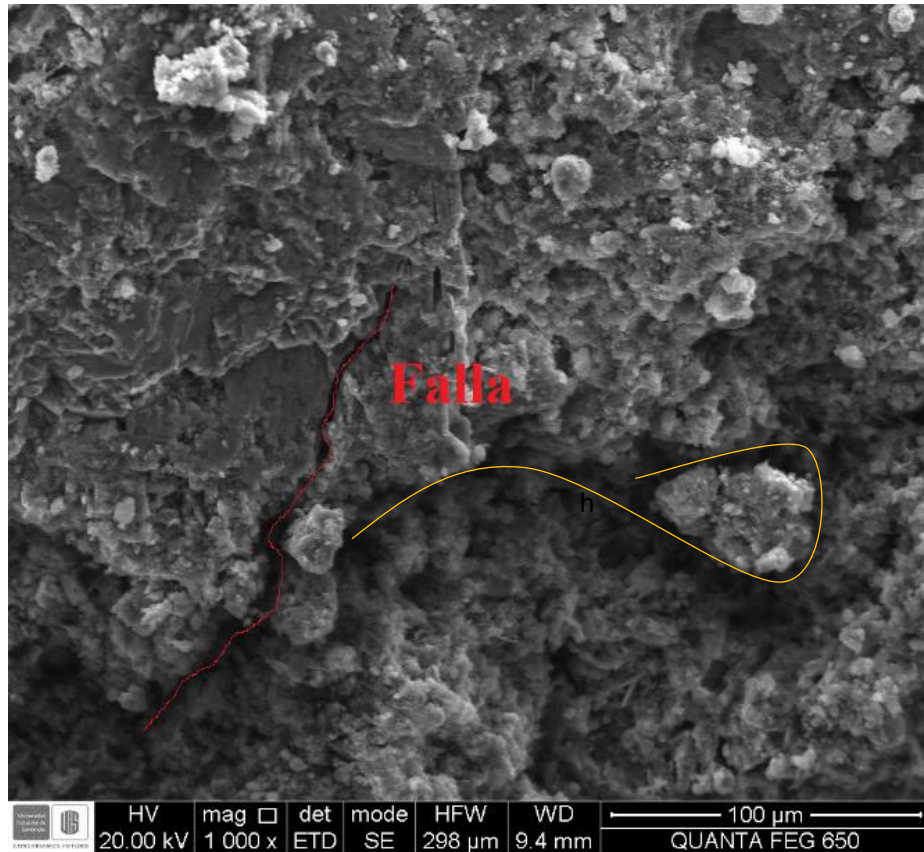
5.5.1 Análisis SEM para la mezcla de concreto convencional, 100% AGN. En la Imagen 9 se puede apreciar la zona de transición interfacial (ZTI) entre el mortero y el agregado grueso natural, también se observan zonas claras donde hay mayor cantidad de pasta cementante. Se puede apreciar además la buena cohesión entre la pasta cementante, con los agregados. La línea amarilla muestra una fisura en el AGN, la cual quizás fue producida por el exceso de esfuerzos en el ensayo a compresión.

Imagen 9. Micrografía realizada a la muestra de concreto convencional, 100% AGN.



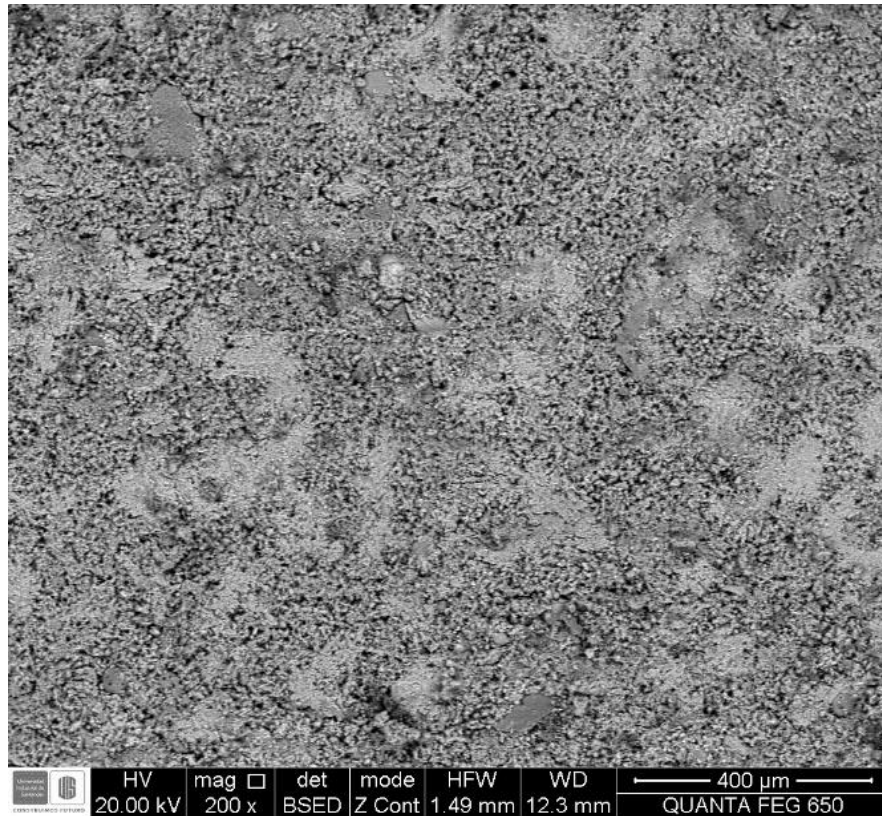
En las Imágenes 9 y 10 se observa una falla típica por debilidad entre la pasta de cemento y los agregados, indicada en la ZTI (Línea roja). También se aprecia una baja cantidad de poros, el tamaño de estos poros es muy pequeño como para tener efectos adversos en la resistencia de la mezcla; en la Imagen 10, se observa una fisuración severa en la pasta cementante, indicada con una línea amarilla, la cual quizá fue generada en el ensayo a compresión.

Imagen 10. Micrografía realizada a la muestra de concreto convencional.



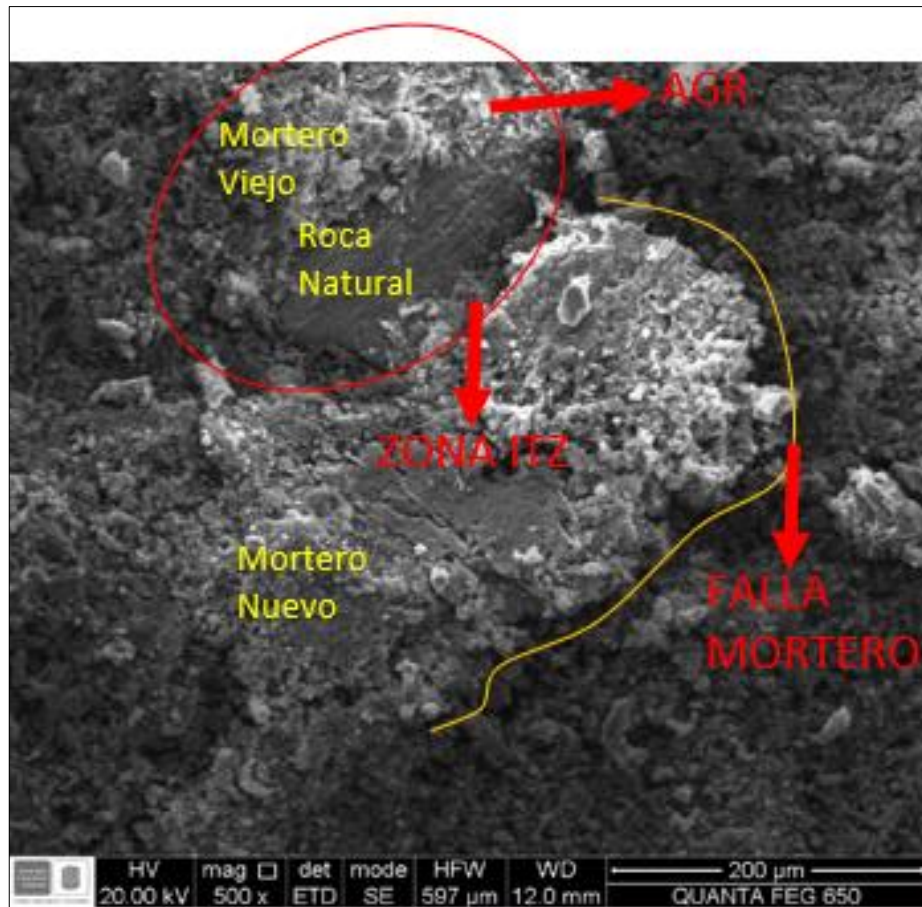
5.5.2 Análisis SEM para la mezcla de concreto óptima. En la Imagen 11 se puede observar la gran cantidad de poros que la mezcla de AGR posee, estos vacíos afectan el comportamiento mecánico de la mezcla, disminuyendo su resistencia y aumentando la permeabilidad. A edades tempranas, cuando ocurre el fenómeno de exudación interna, los poros en la zona de transición interfacial (ITZ) son mayores que en la pasta de cemento, esto debido a que la ITZ es el límite entre dos materiales totalmente distintos, uno rígido y una mezcla aglutinante y densa de cemento- arena ^[30].

Imagen 11. Micrografía realizada a la muestra de concreto óptima



En la Imagen 12 se observa además de la porosidad de la mezcla, la ZTI del agregado grueso reciclado y el mortero, además se puede apreciar el AGR compuesto de mortero viejo y roca natural, encerrado en un círculo rojo. Se observan fallas en el mortero producto de los esfuerzos generados en la prueba a compresión; se puede apreciar la fisura en la pasta cementante y la pasta del AGR indicada en la ZTI (línea amarilla), hay varias versiones respecto a la fisura generada, una, que sea debido a la baja cohesión entre pasta nueva y la pasta del AGR, la otra, es que sea debido al ensayo a compresión [38].

Imagen 12. Micrografía realizada a la muestra de concreto reciclado óptima.



5.6 Análisis de la microestructura de la interface agregado-matriz por medio de microscopía óptica.

En la imagen 13 se observa la muestra tomada para el análisis de microscopía óptica, se puede apreciar a simple vista parte de los agregados y el mortero, en esta se visualiza una menor porosidad en comparación con la muestra de concreto óptima (ver Imagen 14).

Imagen 13. Muestra de concreto convencional pulida.

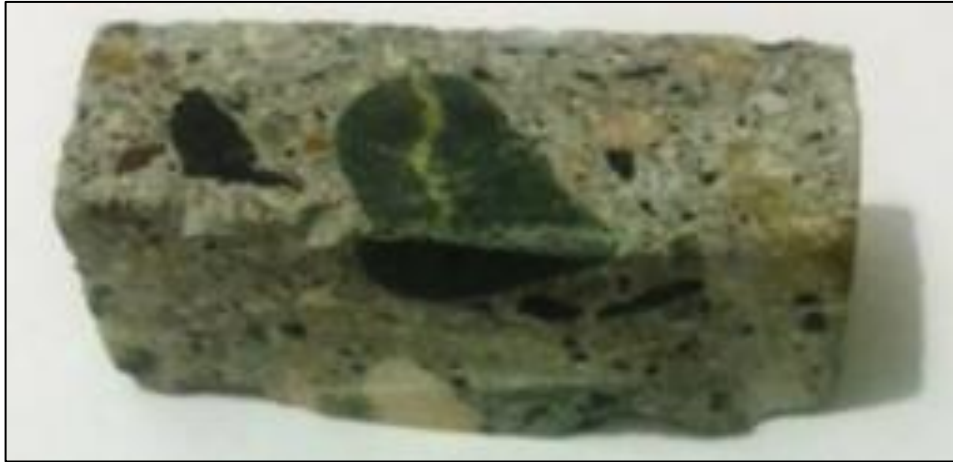
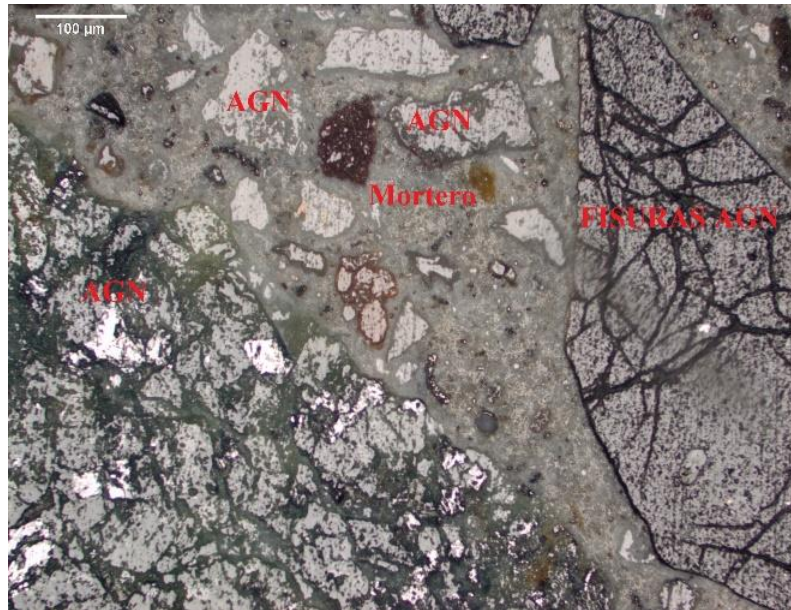


Imagen 14. Muestra de concreto óptimo pulida.



En la Imagen 15 se pueden observar varias fisuras en el agregado grueso natural, zonas donde ocurren las fallas a compresión, se observa una buena adherencia entre los agregados y el mortero.

Imagen 15. Microscopia óptica de la mezcla de concreto convencional



En las Imágenes 16 y 17 se observa la presencia del mortero que conforma el agregado reciclado, este presenta un tono más oscuro que el mortero nuevo, se observa una buena adherencia entre el mortero del material reciclado y el nuevo.

Imagen 16. Microscopia óptica de la mezcla de concreto óptima.

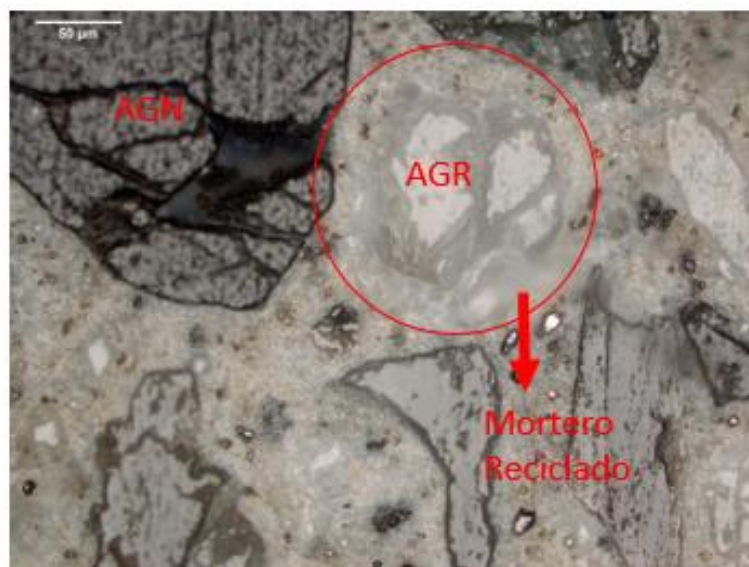
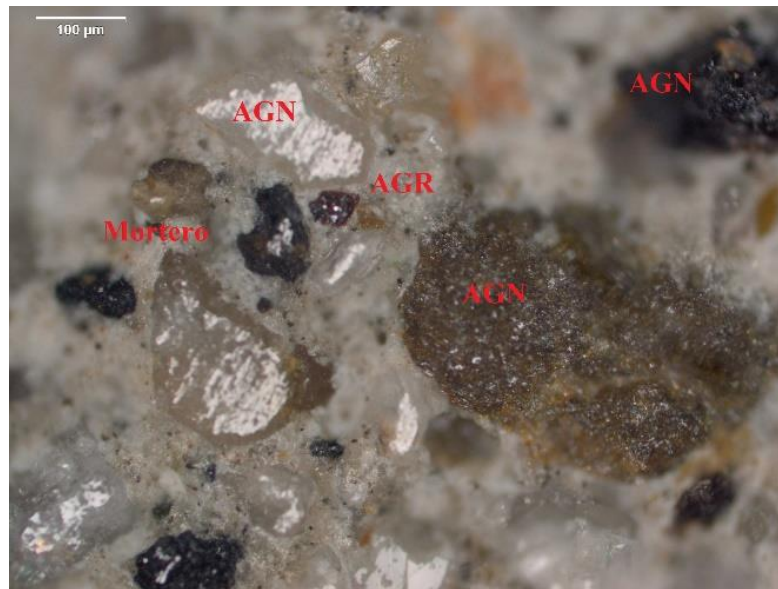


Imagen 16. Microscopia óptica de la mezcla de concreto óptima.



5.7 Análisis de costos de mezcla de concreto con AGR y de concreto convencional (100% AGN).

El material reciclable al ser material de desecho producido por una concretera, no tiene ningún costo, el costo viene aplicado en la trituración de este; ya que para volver a hacer concreto, se requieren las mismas especificaciones y normas que para un concreto convencional; se requiere de un tamaño máximo y un tamaño máximo nominal del agregado grueso reciclado.

Los precios que se van a utilizar para cotizar el precio de los concretos en esta investigación son tomados de la revista Construdata, Colombia ^[39]. El agregado reciclado en tamaño $\frac{3}{4}$ de pulgada tiene un costo que se compone de 2 factores, el primero es el valor de los escombros, que muchas veces no tiene ningún precio (como en este caso), y el servicio de triturada en trituradora de mandíbula, que en esta investigación tuvo un precio de \$5000 bulto de 30 Kg de triturado. Ver Tabla 13.

A continuación, en la Tabla 12, se puede observar el precio de las materias primas de un concreto de 100% de AGN.

Tabla 12. Costo de producción por metro cubico de la mezcla de concreto convencional.

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
Bulto Cemento de Alta Resistencia Temprana Argos	Bto X 50	6.00	\$29.400	\$176.401
Agregado Fino (Arena)	kg	0.33	\$41.347	\$13.537
Agua	m ³	164.00	\$16	\$2.624
Agregado Grueso Natural TMN 3/4"	Litro	0.35	\$31.088	\$10.965
SUBTOTAL DE MATERIALES			\$ 203.528,5	

Tabla 13. Costo de producción por metro cubico de la mezcla de concreto óptima.

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
Bulto Cemento de Alta Resistencia Temprana Argos	Bto X 50	6.00	\$29.400	\$176.401
Agregado Fino (Arena)	kg	0.34	\$41.347	\$13.886
Agua	m ³	174.00	\$16	\$3.200
Agregado Grueso Natural TMN 3/4"	Litro	0.26	\$31.088	\$8.225
Agregado Grueso Reciclado TMN 3/4"	m ³	0.08	\$100.000	\$7.975
SUBTOTAL DE MATERIALES			\$ 209.688,8	

Comparando las Tablas 12 Y 13, se analiza que, así como se disminuyen costos reemplazando el 25%AGN por AGR, el costo total del m³ de concreto aumenta, ya que el costo de triturada fue muy alto para efectos de la investigación, la compañía de concretos que produzca concreto reciclado debe tener su propia planta de trituración de escombros de concreto, y de esta manera si vería resultados en la reducción de costos reutilizando agregados.

6. CONCLUSIONES

- En el análisis de desgaste en condición S.S.S, se comprobó que el comportamiento de desgaste de los agregados en condición seca o saturado superficialmente seca es el mismo; se desgasta en aproximadamente un 6% superior el AGR que el AGN, esto es debido a que la superficie que recubre el AGR es de un mortero reutilizado, mientras que la superficie del AGN es roca natural, y por lo tanto su resistencia al impacto y al desgaste es mucho mayor. Se infiere que en el primer intervalo de tiempo de 10 min hay un mayor porcentaje de desgaste que en los siguientes intervalos (20 y 30 min), esto debido una vez más a la dureza de la superficie que recubre cada agregado.
- Al observar la evolución de resistencia de las diferentes mezclas de concreto, se percibió que M0 y M25 supero a los 28 días la resistencia de diseño (21 MPa), esto debido que se utilizó un cemento ART, y el método del diseño de mezcla es basado en la ACI 211.
- Con un nivel de confianza del 90%, según análisis de experimentos, se concluye que la mezcla M25 no presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a la mezcla M0 (mezcla patrón), por lo tanto, esta es la mezcla óptima a la compresión a los 7 días.
- Buscando alternativas para el uso del diseño de mezcla, se concluye que la mezcla optima realizada, no cumple requerimientos establecidos por el IDU para ser utilizada como concreto hidráulico de pavimentos.
- En el análisis micrográfico se evidenciaron las zonas de transición interfacial entre los agregados y la pasta cementante, además se observaron varias fisuras en los agregados y una mayor cantidad de poros en la mezcla óptima,

lo cual se vio reflejado en una leve disminución en su comportamiento mecánico, en comparación a la mezcla de concreto convencional.

- El precio de la trituración de los escombros de concreto aumentó el costo del concreto con AGR, cuando debería ser opuesto su valor por ser un agregado reutilizado sin ningún valor comercial. Para efectos de la investigación se pagó por la triturada, pero si la compañía de concretos va a producir un concreto reciclado para la industria, debe tener su propia planta de trituración de escombros de concreto, y así reducir este costo extra.
- Para la elaboración de concreto con agregado reciclado es recomendable seleccionar detalladamente el material reciclado; los escombros presentan restos de metales, materiales cerámicos, partes de madera y arcilla que pueden afectar en gran manera la resistencia del concreto.
- Se recomienda ser muy cuidadoso con el ajuste granulométrico para el agregado reciclado después de triturado, el tamaño de partículas afecta diversos factores como la resistencia, el proceso de compactación en obra, el porcentaje de vacíos, y debe cumplir con las normas técnicas para el diseño de mezcla.
- Si se desea producir concreto con agregado reciclado es de vital importancia el uso de aditivos que mejoren la distribución de las partículas de cemento con los agregados, tal como un superplastificante que genera una mezcla más homogénea, de mayor fluidez y trabajabilidad o un retardante que aumenta el tiempo de fraguado del concreto y tiene un porcentaje de reducción de agua.

BIBLIOGRAFÍA

ACI COMMITTEE 211. "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete", Michigan, Farmington Hills, 1998.

Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A.E.S.P. pH del agua disponible en: <http://www.amb.com.co/documento/info/resumen-buc-2015.pdf>

AGUILAR Mónica y ARDILA Ferney. Estudio de alternativas de manejo de escombros generados por la construcción y demolición de edificaciones en la ciudad de Bogotá. Trabajo de grado especialización en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Química. 2010. 42p.

BEDOYA MONTOYA Carlos Mauricio, "El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles" Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (Julio 2013).

CHÁVEZ Álvaro, GUARÍN Nataly, CORTES María. Determinación de propiedades físico-químicas de los materiales agregados en muestra de escombros en la ciudad de Bogotá d. c. Medellín. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2013. ISSN 1692-3324.

Consejo Mundial Empresarial Para El Desarrollo Sostenible – WBCSD "RECICLANDO CONCRETO". Washington, D.C. Disponible en: <http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete->

DE BRITO, Jorge y SAIKIA, Nabajyoti. Recycled Aggregate in Concrete. Use of Industrial, Construction and Demolition Waste. Primera Edición. Londres. 2013.

Especificaciones IDU-ET 2005-2006. Pavimento de Losas de Concreto Hidráulico. Sección 600-05. Criterios de diseño de la mezcla de concreto hidráulico. Tabla 600.6.

Ficha técnica cemento HE, alta resistencia temprana. ARGOS.

GÓMEZ José M., AGULLO Luis, VÁSQUEZ Eric. Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados de Concreto. Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Hoja técnica Aditivo retardante y plastificante Plastiment®AD 30, de SIKA.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 127, “Ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”, Colombia, 2000.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 176, “Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso”, Colombia, 1995.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 237, “Ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado fino”, Colombia, 1995.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 2871. “Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión” Colombia, 2004.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 396, “Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto”, Colombia, 1992.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 4025, “Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión”, Colombia, 2006.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 550, “Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra”, Colombia, 2007

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 673, "Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto", Colombia, 2010.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 722, "Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto ", Colombia, 2000.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 77, "Ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos", Colombia, 2007

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 92, "Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados" Colombia, 1995.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación NTC 98, "Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados gruesos hasta 37,5 mm utilizando la máquina de los ángeles", Colombia, 1995.

J. de Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, M. Guerreiro; Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete; Journal of Building Engineering 6 (2016); EL SEVIER 1-16.

La microscopia electrónica de barrido SEM (I) Concepto y usos; www.patologiasconstruccion.net/2012/12/la-microscopia-electronica-de-barrido-sem-i-concepto-y-usos/ (Citado el 5 de Enero de 2017).

Montgomery Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos, Segunda Edición, Editorial Limusa SA. México D.F. 2004, Pag 23.

Montgomery Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos, Segunda Edición, Editorial Limusa SA. México D.F. 2004, Pag 63.

Norma Sismo resistente Colombiana 2010, NSR-10, Título C, 10.2.5.

Norma Sismo resistente Colombiana 2010, NSR-10, Titulo C, 8.5.

Portada de página oficial del software STATGRAPHICS®. www.statgraphics.net, [Citado el 25 de Diciembre de 2016].

Revista CONSTRUDDATA. Precios insumos para concretos.

Sánchez de Guzmán, Diego, Tecnología y Propiedades del Concreto; Segunda Edición, Instituto del Concreto, Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colombia 2000, p.110-111.

Sánchez de Guzmán, Diego, Tecnología y Propiedades del Concreto; Segunda Edición, Instituto del Concreto, Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colombia 2000, p.133.

Sánchez de Guzmán, Diego, Tecnología y Propiedades del Concreto; Segunda Edición, Instituto del Concreto, Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colombia 2000, p.139.

Tipos de Cemento Portland. www.apuntesingenierocivil.blogspot, [Citado el 07 de Enero de 2017].

Valcuende Paya, Manuel, Marco Serrano, Empar, Jardón Giner, Rafael, Gil Andrés, Alejandro. "Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura".

Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Construcciones Arquitectónicas.

ZAPATA ORDUZ Luis, GARCIA VERA German, PLAZAS ROJAS Juan, HERNANDEZ ROMERO Jhon, "DESEMPEÑO MECANICO Y EN ESTADO FRESCO EN MEZCLAS DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON AGREGADO DE CONCRETO RECICLADO", 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference.