

**CARBONATACIÓN ACELERADA EN AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO Y
EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS**

Ing. CARLOS ARNULFO MONJE LOMBO
Ing. DIEGO JOSÉ RODRÍGUEZ VILLARREAL



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS VIALES
BOGOTÁ D.C.
AGOSTO DE 2016

**CARBONATACIÓN ACELERADA EN AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO Y
EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS**

Ing. CARLOS ARNULFO MONJE LOMBO
Ing. DIEGO JOSÉ RODRÍGUEZ VILLARREAL

PROYECTO DE GRADO

Directora:
Nancy Torres Castellanos.
Ingeniera Civil
M.Sc – Ph.D



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS VIALES
BOGOTÁ D.C.
AGOSTO DE 2016

Nota de Aceptación

Firma del Director de Proyecto.
NANCY TORRES CASTELLANOS

Firma del Co - Director de Proyecto.
MARFA CAROLINA MOLANO CAMARGO

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Bogotá,

--	--	--

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitir concluir este trabajo de grado satisfactoriamente, a la Escuela Colombiana de Ingeniería por acogernos como sus alumnos, en especial a la ingeniera Nancy Torres quien nos creyó, guio y apoyó en este proceso, a los laboratoristas Edgar Contreras y Ramón Torres por sus consejos en el desarrollo de los ensayos, a nuestros jefes que con sus permisos laborales nos permitieron desarrollar múltiples actividades de este trabajo.

Al trabajo en equipo y entendimiento mutuo, fue un factor clave para lograr el cumplimiento de este objetivo, fue una prueba de resistencia, persistencia e insistencia, que pensamos en algún momento no alcanzar, pero en equipo se logró.

Por último queremos agradecer a nuestras familias y amigos cercanos (esposas, hijos, padres, hermanos) que con sus voces de aliento y consejos nos dieron el ánimo necesario para poder reponernos a las adversidades y lograr terminar satisfactoriamente este trabajo de grado, este logro académico es suyo también.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	14
0. INTRODUCCIÓN	16
1. TITULO TRABAJO DE GRADO	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. OBJETIVOS	22
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
5. ANTECEDENTES	23
6. MARCO TEÓRICO.....	28
6.1. AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO (ARC).....	28
6.2. DESEMPEÑO DE LOS ARC EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS.....	30
6.3. CONCRETOS CON ARC	30
6.4. TECNOLOGÍA DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CAD), POR MEDIO DE CARBONATACIÓN ACELERADA	33
6.5. REACCIONES QUÍMICAS DURANTE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN....	34
7. PROGRAMA EXPERIMENTAL - METODOLOGÍA.....	35
7.1. DETERMINACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC) GRUESO CARBONATADO ÓPTIMO	37

7.2.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	38
7.2.1.	Propiedades Físicas.....	40
7.2.2.	Granulometría.	40
7.2.3.	Propiedades de Dureza.....	41
7.2.4.	Propiedades de Durabilidad.	43
7.2.5.	Limpieza.....	44
7.2.6.	Geometría de Partículas.....	44
7.2.7.	Características Químicas	46
7.2.8.	Otras Propiedades.	47
7.3.	ENSAYOS MEZCLAS DE CONCRETO	48
7.3.1.	Asentamiento.	48
7.3.2.	Resistencia a la Compresión.....	48
7.3.3.	Módulo de Elasticidad.	49
7.3.4.	Módulo de Rotura.....	49
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50
8.1.	DETERMINACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC) GRUESO CARBONATADO ÓPTIMO	50
8.2.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	53
8.2.1.	Propiedades Físicas.....	54
8.2.2.	Granulometría.	56
8.2.3.	Propiedades de Dureza.....	57
8.2.4.	Propiedades de Durabilidad.	60
8.2.5.	Limpieza.....	61
8.2.6.	Geometría de Partículas.....	62
8.2.7.	Características Químicas	65

8.2.8. Otras Propiedades.	66
8.3. ENSAYOS MEZCLAS DE CONCRETO	72
8.3.1. Asentamiento.	75
8.3.2. Resistencia a la Compresión.	76
8.3.3. Módulo de Elasticidad.	78
8.3.4. Módulo de Rotura.	81
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
10. PROPUESTA TRABAJOS FUTUROS	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Etapas para el Desarrollo de Trabajo de Grado	36
Figura 2. Ensayo de Densidad y Absorción (Agregados).....	40
Figura 3. Gradación de Agregados.	41
Figura 4. Ensayo de Máquina de los Ángeles (Agregados).....	42
Figura 5. Ensayo Micro Deval (Agregados).....	42
Figura 6. Ensayo 10% de Finos (Agregados).....	43
Figura 7. Ensayo de Sulfatos (Agregados).....	44
Figura 8. Ensayo de Terrones de Arcilla (Agregados).....	44
Figura 9. Ensayo de Partículas Fracturadas (Agregados).....	45
Figura 10. Ensayo Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregados).....	46
Figura 11. Ensayo Contenido de Azufre (Agregados).	46
Figura 12. Ensayo de PH (Agregados).	48
Figura 13. Prueba de Fenolftaleína al 1%.	51
Figura 14. Ingreso de ARC a la Cámara de Carbonatación – Etapa 1.	52
Figura 15. Ingreso de los Agregados Reciclados a la Cámara de Carbonatación.	53
Figura 16. Fijación de los Parámetros de la Cámara de Carbonatación.....	53
Figura 17. Elaboración Mezclas de Concreto para Cilindros.	72
Figura 18. Cilindros de Concreto Fresco en sus Moldes.	74
Figura 19. Elaboración de Mezclas de Concreto para Vigas.	74
Figura 20. Vigas de Concreto Fresco en sus Moldes.	75
Figura 21. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).	75
Figura 22. Desencofrado y Curado de Cilindros de Concreto.	77

Figura 23. Curado de Vigas de Concreto.....	81
Figura 24. Ensayo de Flexión.	82

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Ensayos en Agregados Gruesos para evaluar Viabilidad de Uso en Mezclas de Concreto para Vías.....	37
Tabla 2. Tabla 500-4 Requisitos del Agregado Grueso para Pavimentos de Concreto Hidráulico.....	38
Tabla 3. Tabla 500-3 Granulometrías Agregado Grueso Pavimentos en Concreto Hidráulico.....	39
Tabla 4. Resultados de la Prueba - Ensayos de Absorción y Densidad.	50
Tabla 5. Resultados de la Prueba de Absorción y Densidad.....	52
Tabla 6. Resultados Ensayo Densidad y Absorción (Agregados)	54
Tabla 7. Granulometría (Agregados Gruesos)	56
Tabla 8. Máquina de los Ángeles (Agregados gruesos).....	57
Tabla 9. Micro-Deval (Agregados gruesos).....	58
Tabla 10. 10% Finos (Agregado Grueso).....	59
Tabla 11. Perdida Ensayo Solidez Sulfatos (Agregado Grueso).	60
Tabla 12. Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables (Agregado Grueso).....	62
Tabla 13. Partículas Fracturadas Mecánicamente (Agregado Grueso).	63
Tabla 14. Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregado Grueso).....	64
Tabla 15. Determinación del Contenido de Azufre (Agregado Grueso).....	65
Tabla 16. Medición de PH (Agregado Grueso)	69
Tabla 17. Resumen de Caracterización de Agregados.	71
Tabla 18. Parámetros de Entrada para Diseño de Mezcla.	72
Tabla 19. Diseño de Mezclas de Concreto.....	73
Tabla 20. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).....	75

Tabla 21. Tolerancias en el Asentamiento y en el Contenido Definido en la Fórmula de Trabajo	76
Tabla 22. Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 Días (Concreto).....	77
Tabla 23. Módulo de Elasticidad a 7 y 28 Días.	79
Tabla 24. Relación E_c/f'_c	80
Tabla 25. Datos Ensayo de Flexión y Cálculo del MR.....	81
Tabla 26. Criterios de Diseño para la Mezcla de Concreto en Pavimentos de Concreto Hidráulico.....	83
Tabla 27. Niveles de Tránsito.	84

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Ensayo Densidad (Agregados Gruesos).....	55
Gráfica 2. Ensayo de Absorción (Agregados Gruesos).....	55
Gráfica 3. Máquina de los Ángeles (Agregados gruesos).	57
Gráfica 4. Micro-Deval (Agregados Gruesos).	58
Gráfica 5. 10% Finos (Agregado Grueso)	59
Gráfica 6. Perdida Ensayo Solidez Sulfatos (Agregado Grueso).....	61
Gráfica 7. Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables (Agregado Grueso).	62
Gráfica 8. Partículas Fracturadas Mecánicamente (Agregado Grueso).	64
Gráfica 9. Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregado Grueso).	65
Gráfica 10. Determinación del Contenido de Azufre (Agregado Grueso).	66
Gráfica 11. Análisis Termogravimétrico para ARC Carbonatado Óptimo.	67
Gráfica 12. Análisis Térmico Diferencial para ARC Carbonatado Óptimo.	68
Gráfica 13. Medición de PH (Agregado Grueso).....	69
Gráfica 14. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).....	76
Gráfica 15. Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 Días (Concreto).	78
Gráfica 16. Módulos de Elasticidad.....	80
Gráfica 17. Relación E_c/f'_c	81
Gráfica 18. Módulo de Rotura Calculados.....	83

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Formatos de Laboratorio de los Ensayos Realizados.	91
Anexo B. Manual de la Cámara de Carbonatación.	91
Anexo C. Cronograma Actualizado.	91
Anexo D. Presupuesto de Ejecución.	91
Anexo E. Cálculos de los Ensayos en Concretos.	91

RESUMEN

Este trabajo de grado tuvo como objetivo optimizar algunas condiciones de operación del proceso de carbonatación acelerada empleado en el tratamiento de los agregados reciclados de concreto gruesos, evaluando algunas propiedades físicas, químicas, de dureza y durabilidad, así como su desempeño en mezclas de concreto para vías vehiculares.

El proyecto se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa se evaluaron algunos parámetros del proceso de carbonatación acelerada y la influencia del contenido de humedad de los ARC en el proceso de carbonatación para determinar los parámetros óptimos de fijación de CO₂ al ARC en la cámara de carbonatación. En la segunda etapa se caracterizaron los ARC carbonatados óptimos comparando sus propiedades con relación a agregados naturales y ARC no carbonatados, verificando el cumplimiento o no de los requisitos establecidos en norma INVIAS 2013 sección 200 “agregados pétreos”, por último y como tercera etapa se desarrollaron 7 mezclas de concreto para ensayos de resistencia a la compresión y cálculo de módulos de elasticidad y rotura, verificando cumplimiento respecto a norma INVIAS 2013 “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” Capítulo 5 – Pavimento de Concreto.

Los resultados de la primera etapa indican que los parámetros para obtener la fijación óptima de CO₂ al agregado corresponden a temperatura 23°, humedad del ARC seco al horno, tiempo de exposición de dos semanas para tamaño máximo de ¾”, Concentración de CO₂ del 10% (máxima de la cámara) y humedad relativa de 65%.

Al ejecutar el programa experimental en la segunda etapa se midieron propiedades físicas, granulometría, dureza, durabilidad, limpieza, geometría de partículas, químicas y otras (medición de PH), los resultados para los ARC carbonatados óptimos indican que cumplen los requerimientos de las especificaciones generales de construcción para carreteras INVIAS 2013, a excepción del Índice de Alargamiento.

El proceso de carbonatación acelerada en agregados reciclados de concreto con tamaño máximo de ¾” mejora algunas características respecto al no carbonatado, como lo son el aumento de la densidad, disminución del porcentaje de absorción y mejora del desempeño en presencia de Sulfatos.

La tercera etapa demostró que las mezclas de concreto con 100% ARC carbonatados óptimos cumplen los requerimientos estipulados en las especificaciones generales de construcción para carreteras INVIAS 2013, en lo referente a asentamientos, resistencia a la compresión medidos a 7 y 28 días, densidad, módulo de elasticidad medido a 7 y 28 días, así como resistencia a la flexión a los 28 días. Se presentó un comportamiento similar entre las mezclas 100% ARC y ARC carbonatados en lo relativo a la resistencia a compresión a 7 y 28 días, respecto al módulo de elasticidad se presentó un aumento en magnitud considerable de los 7 a 28 días.

Palabras Clave: ARC – Agregado Reciclado de Concreto –Carbonatación Acelerada – Agregado Carbonatado Grueso – Mezcla - Concreto.

ABSTRACT

This degree work aimed to optimize some operating conditions of the accelerated carbonation process used in the treatment of recycled coarse aggregates concrete, evaluating some physical, chemical, hardness and durability properties as well as their performance in concrete mixes for vehicular roads.

The project was developed in three stages. In the first stage, some parameters of the accelerated carbonation process were evaluated and the influence of the humidity content of the ARC in the carbonation process to determine the optimal parameters of CO₂ fixation to the ARC in the carbonation chamber. In the second stage the optimum carbonate ARCs were characterized comparing their properties in relation to natural aggregates and non-carbonated ARCs, verifying compliance or not with the requirements established in the INVIAS 2013 standard section 200 "stone aggregates", finally, as a third step, 7 concrete mixtures were developed for tests of resistance to compression, and calculation of modulus of elasticity and rupture, verifying compliance with the INVIAS 2013 standard "General Road Construction Specifications" Chapter 5 - Concrete Pavement.

The results of the first stage indicate that the parameters to obtain the optimal CO₂ fixation to the aggregate correspond to temperature 23°, humidity of the ARC dry in oven, exposure time of two weeks For maximum size of $\frac{3}{4}$ ", 10% of CO₂ concentration (maximum of the camera) and relative humidity of 65%.

When the experimental program was executed in the second stage, physical properties, particle size, hardness, durability, cleaning, particle geometry, chemical and others (PH measurement) were measured, the results for the optimum carbonate ARCs indicate that it comply the requirements of the general road construction specifications INVIAS 2013, with the exception of the elongation index.

The accelerated carbonation process in recycled concrete aggregates with maximum size of $\frac{3}{4}$ ", improves some characteristics with respect to non-carbonated, such as, increased density, decrease in absorption percentage, and improves performance in the presence of sulfates.

The third stage demonstrated that concrete mixtures with 100% optimal carbonated ARC comply the requirements stipulated in the general road construction specifications INVIAS 2013, in reference to slump, compressive strength measured at 7 and 28 days, density, modulus of elasticity measured at 7 and 28 days, as well as flexural strength at 28 days. A similar behavior was observed between the 100% ARC and carbonated ARC mixtures in relation to the resistance to compression at 7 and 28 days, respect to the modulus of elasticity an increase in considerable magnitude occurred from 7 to 28 days.

Keywords: ARC - Concrete Recycling Aggregate – Accelerated Carbonation - Coarse Carbonated Aggregate – Mixture – Concrete.

0. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos de nueva infraestructura o adaptaciones a las existentes en los centros urbanos, motivados por las dinámicas económicas, han generado un aumento considerable en los residuos de demolición y construcción en el mundo. Estos residuos denominados escombros de concreto causan daños severos al ambiente, afectan el espacio público y aumentan la necesidad de recursos para su disposición final en zonas urbanas.

Por ejemplo, en Bogotá solo el 5% de estos residuos es reciclado, es decir, incorporado a cadenas de aprovechamiento (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría de Ambiente, 2012). De otro lado, la explotación de recursos naturales para la producción de agregados utilizados en la industria de la construcción, es un proceso que genera un alto impacto ambiental. Se estima que para producir una tonelada métrica de agregado grueso en Colombia, se emiten aproximadamente a la atmósfera 0,0098 Ton CO₂/ Ton de Agregado Grueso (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2013).

Se han realizado diferentes investigaciones donde se reemplaza parcialmente los agregados naturales por agregados reciclados, obteniéndose en estos casos una disminución leve de los valores de las propiedades físicas, mecánicas y químicas (Bojacá Castañeda, 2013) y (Laverde, 2014); igualmente se han estudiado las principales propiedades físico-químicas y mecánicas de los agregados reciclados, generados en los residuos de construcción y demolición, que son factibles para utilizar como mezclas en capas de rodadura, bases y sub bases. (Jiménez, 2013). En los últimos avances se buscó igualar las propiedades de los concretos con agregados naturales, a los concretos con agregados reciclados, sometiendo estos últimos a un proceso de carbonatación acelerada, el cual consiste en exponer los agregados a una concentración de CO₂ mucho mayor que la concentración en el aire ambiente (Turcry, Oksri-Nelfia, Younsi, & Aït-Mok, 2014), con el fin de estudiar sus efectos al involucrarlos en las mezclas de concreto (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014), los parámetros que inciden durante su ejecución son: temperatura, presión, humedad relativa, concentración (Nordic Innovation Centre, 2006) posteriormente se evalúan las propiedades de los agregados y de la mezcla de concreto que los contiene, modificados mediante esta técnica (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló esta propuesta de Trabajo de Grado, la cual se tituló: **“CARBONATACIÓN ACELERADA EN AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS”**. Este proyecto tuvo como objetivo evaluar algunas propiedades mecánicas y de durabilidad de los agregados reciclados de concreto (ARC grueso) utilizados en vías, así como su desempeño en mezclas de concreto para ser usados en vías vehiculares, optimizando algunas condiciones de operación del proceso de carbonatación acelerada empleado en el tratamiento de los Agregados Reciclados Concreto.

El proyecto se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa se evaluaron algunos parámetros del proceso de carbonatación acelerada y la influencia del contenido de humedad de los ARC en el proceso de carbonatación para determinar los parámetros óptimos de fijación de CO₂ al ARC en la cámara de carbonatación. En la segunda etapa

se caracterizaron los ARC carbonatados óptimos comparando sus propiedades con relación a agregados naturales y ARC no carbonatados; verificando el cumplimiento o no de los requisitos establecidos en norma INVIAS 2013 sección 200 “agregados pétreos”, por último y como tercera etapa se desarrollaron mezclas de concreto con y sin porcentajes de remplazo para ensayos de resistencia a la compresión y cálculo de módulos de elasticidad y rotura, verificando cumplimiento respecto a norma INVIAS 2013 “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” Capítulo 5 – Pavimento de Concreto.

El desarrollo de este proyecto permitió caracterizar y conocer el desempeño de los agregados reciclados de concreto (ARC) Carbonatados respecto a ARC y agregados naturales, todos ellos gruesos, a la vez que se verificó el cumplimiento o no de norma INVIAS. De la misma manera se analizó el comportamiento del ARC carbonatado en mezclas de concreto respecto a densidades, asentamientos, resistencia a la compresión, flexión y módulo de rotura, para 7 tipos de mezclas que incluían porcentajes de remplazo (Combinación de agregados).

Resultados que enseñaron las fortalezas y debilidades del ARC Carbonatado dentro de las mezclas de concreto, igualmente se evaluó respecto a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras de INVIAS 2013, Capítulo 5 – Pavimento de Concreto.

1. TITULO TRABAJO DE GRADO

CARBONATACIÓN ACELERADA EN AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ***CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN INGENIERÍA CIVIL - mediante el uso de técnicas modernas para la caracterización composicional de materiales empleados en infraestructura vial.***

Director: NANCY TORRES CASTELLANOS
Ingeniera Civil.
Master en Estructuras
Doctora en Ingeniería.

Co-Director: MARFA CAROLINA MOLANO
Ingeniera Civil.
Master en Estructuras

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los requerimientos de nueva infraestructura o adaptaciones a las existentes en los centros urbanos del mundo, motivadas por las dinámicas económicas, ha generado un aumento considerable en los residuos de demolición y construcción. Por ejemplo, en China se generaron en el año 2014, aproximadamente 200 millones de toneladas de residuos de concreto; con una tasa de crecimiento anual del 8% su producción se incrementará en 638 millones de toneladas para el año 2020 (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014). En Colombia, específicamente en la ciudad de Bogotá, en el año 2012, se generaron alrededor de 12 millones de M³ de escombros (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría de Ambiente, 2012). Para el año 2020, la proyección en el volumen de escombros será casi 24 millones de M³ (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría Distrital de Habitat, 2009), aumentando la contaminación urbana y la necesidad de áreas y recursos para su disposición final.

Por otra parte, la industria de la construcción consume masivamente recursos naturales no renovables como agregados, en Bogotá el consumo de materiales para construcción es 12,4 Millones de Toneladas al año (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2014), del cual solo el 5% es reciclado, es decir, incorporado a cadenas de aprovechamiento (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría de Ambiente, 2012).

Adicionalmente el sector de la construcción genera un alto porcentaje de dióxido de carbono CO₂ en la generación de nuevos agregados; se estima que para producir una tonelada métrica de agregado grueso en Colombia se emiten aproximadamente a la atmósfera 0,0098 Ton CO₂/Ton de Agregado Grueso (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2013); es decir, que en promedio se estarían emitiendo 121.500 Ton CO₂ anuales para suplir las necesidades de materiales en la Capital Colombiana.

Se han estudiado las propiedades mecánicas y de durabilidad de los Agregados Reciclados de Concreto (ARC), encontrando que en las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados del módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, y las propiedades de durabilidad, son más bajos que en concretos elaborados con agregado natural (Laverde, 2014), debido a sus propiedades entre ellas su absorción, densidad, contenidos de impurezas, resistencia a la abrasión y a la presencia de porciones de mortero viejo adheridas (generalmente fisuradas) a la superficie del ARC, lo que confiere mayor porosidad y capacidad de absorción de agua; razones por las cuales no se ha masificado su uso. Se han aplicado técnicas para la utilización de los ARC, provenientes de la trituración del concreto de demoliciones o del concreto sobrante en plantas de producción, como lo son la separación física, tratamientos químicos y térmicos. En Bogotá el método más utilizado es la separación física producto de la trituración para producir los ARC; sin embargo, algunos son de muy bajo desempeño y no cumplen los parámetros de calidad, ambientales, ni laborales en su fabricación (Castaño, Misle Rodríguez, Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).

En varias investigaciones se ha indicado que la carbonatación acelerada en los residuos de concreto es una aplicación prometedora y beneficiosa para el medio ambiente (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014), y que estos materiales absorben CO_2 dependiendo de muchas variables, incluyendo el tipo de concreto y su aplicación (Nordic Innovation Centre, 2006), evaluando las propiedades del agregado y del concreto elaborado con éste que ha sido modificado mediante esta técnica (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013). Se ha reportado que el proceso de carbonatación acelerada permite la fijación del dióxido de carbono (CO_2) a los componentes de Calcio (CaO) contenidos en la porción de mortero adherida a los ARC. La precipitación de los cristales de calcio carbonatado (CaCO_3) genera cambios en la estructura de poros, acompañados por aumento en la densidad, disminución de la porosidad y absorción de agua, mejorando posiblemente su desempeño (Torres, 2015) , razón por la cual es necesario determinar los parámetros óptimos de fijación de CO_2 , y evaluar algunas propiedades físicas, químicas, durables y de dureza de los ARC con carbonatación acelerada y su comportamiento en mezclas de concreto para vías vehiculares.

3. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta las políticas de globalización económica del país, materializadas en los diversos tratados de libre comercio, suscritos y por firmar con diferentes países del mundo, COLOMBIA requiere el desarrollo inmediato de su infraestructura vial. Esta situación implica la construcción de nuevas carreteras y ampliación de las ya existentes, cumpliendo con los estándares internacionales de seguridad, comodidad, capacidad y operación, entre otros, que permitan afrontar este reto, involucrando el desarrollo de obras que garanticen el adecuado funcionamiento de las carreteras como eje fundamental del desarrollo del país.

Sumado a lo anterior, la producción de agregados con baja huella de carbono a partir de escombros derivados de las actividades de demolición del concreto (Agregados Reciclados de Concreto) y su tratamiento utilizando la innovadora tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAD), por medio del proceso de carbonatación acelerada para mejorar su comportamiento mecánico y durable, así como la disminución de su carácter tóxico, es un novedoso proceso que contribuye al cerramiento del ciclo del carbono en los materiales de construcción.

Por las anteriores razones, esta propuesta de investigación es una aplicación prometedora y beneficiosa para el medio ambiente, como lo indica en su estudio (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014) , debido a que mientras se está mitigando el cambio climático al capturar el dióxido de carbono en los ARC, también se está promoviendo el desarrollo sostenible en la infraestructura vial del país, mediante el uso masificado de los Agregados Reciclados de Concreto (ARC) carbonatados. Además, a través del reciclaje, se reduce el consumo de energía, se preservan los recursos naturales no renovables y se alivia la capacidad de las escombreras, mejorando así la calidad del medio ambiente y de los habitantes.

El análisis de esta propuesta de trabajo de grado se enfoca principalmente en el comportamiento de los Agregados Reciclados de Concreto (ARC) con baja huella de carbono y su aplicación específica en mezclas de concreto para vías.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar algunas propiedades mecánicas y durables de los agregados reciclados de concreto carbonatado versus ARC y agregados naturales, utilizados en vías, así como su desempeño en mezclas de concreto para vías vehiculares, optimizando algunas condiciones de operación del proceso de carbonatación acelerada empleado en el tratamiento de los Agregados Reciclados Concreto.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los parámetros del proceso de carbonatación acelerada, como el tiempo de exposición y temperatura con el fin de determinar las condiciones óptimas que permitan una mayor fijación de CO_2 en las partículas de ARC grueso y un mejor desempeño mecánico y durable.
- Observar la influencia que ejerce el contenido de humedad de los ARC gruesos, que permitan una mayor fijación de CO_2 .
- Analizar las propiedades físicas, mecánicas, y de durabilidad, así como la medición del PH y fijación de CO_2 , en los ARC gruesos carbonatados bajo condiciones óptimas, comparándolos con agregados naturales y ARC sin carbonatar.
- Verificar el cumplimiento de la norma INVIAS en cuanto a las características físicas, mecánicas y durables más relevantes, de los ARC gruesos carbonatados óptimos, comparándolos con agregados naturales y ARC sin carbonatar, verificando su desempeño en mezclas de concreto para vías vehiculares.

5. ANTECEDENTES

Al investigar en los portales web científicos donde se publican los artículos recientes sobre el tema en estudio, se encontraron diferentes artículos referentes, de los cuales se presenta un breve resumen:

Artículo denominado “Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation”, Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, School of Civil Engineering, publicado el 26 de diciembre de 2014.

El objeto de esta investigación fue proporcionar una mejor comprensión de los efectos de la carbonatación acelerada sobre la microestructura de los residuos de la pasta de cemento en sus diferentes fases, para ser reutilizado en la producción de nuevos concretos.

“Desde el punto de vista de la utilización eficaz de los recursos y la preservación del medio ambiente, la carbonatación acelerada en los residuos de concreto es una aplicación prometedora y beneficiosa para el medio ambiente. El gas CO_2 generador del efecto invernadero puede ser capturado en los residuos de concreto. En este estudio, las muestras se expusieron a una concentración alta de CO_2 (99,9% en peso) para el proceso de carbonatación acelerada. Los concretos estándar con relación agua / cemento de 0,15 absorbieron el 19,8% en peso de CO_2 después del proceso de carbonatación durante 2h y la resistencia a la compresión fue de 28,6 MPa. El volumen total de poros disminuyó de 0,41 cm^3/g a 0,26 cm^3/g debido a la precipitación de carbonato de calcio y gel de sílice. La resistencia a la compresión tuvo una tendencia de ganancia más lenta”. (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014)

Artículo denominado “Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art”, Nordic Innovation Centre, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI. Publicado en febrero de 2006.

El objeto de esta investigación, consistió en proporcionar información sobre el proceso de carbonatación durante la vida útil del concreto y su uso posterior. Esta información fue utilizada para la evaluación ambiental de edificios y estructuras de concreto, así como para evaluar el efecto de la carbonatación sobre las emisiones globales de CO_2 en la producción de cemento y concreto en los países nórdicos.

“El concreto endurecido absorbe CO_2 en un proceso denominado carbonatación. La capacidad del concreto para unirse a este gas y la velocidad de este proceso, dependen de muchas variables, incluyendo el tipo de concreto y su aplicación. Este proceso no ha sido plenamente documentado, ya que los modelos existentes para calcular la carbonatación no tienen en cuenta el proceso de reciclaje al final de la vida útil del concreto. En consecuencia, se ha sobreestimado el aporte de emisiones de CO_2 a la atmósfera por parte la industria del concreto, influyendo significativamente en la política de CO_2 ; en los criterios de etiquetado ambiental y en la selección de materiales basados en los principios de ser ambientalmente amigables, razón por la cual, se desarrollaron 5 documentos para determinar la captación del CO_2 durante el ciclo de vida del concreto”. (Nordic Innovation Centre, 2006).

Las conclusiones a las que se llegó después de realizar esta investigación fueron las siguientes:

“Los resultados del análisis demostraron que después de 50 a 100 años gran parte de los concretos evaluados no se encontraban carbonatados totalmente, la tasa de carbonatación fue muy baja para concretos de 30 a 40 años de edad. Por lo tanto, una importante absorción de CO₂ podría efectuarse al reciclar el concreto demolido. Los parámetros más importantes que inciden en la carbonatación del concreto son:

- *Relacionados con el medio ambiente o entorno: temperatura, presión, humedad relativa, concentración de CO₂.*
- *Relacionados con el material de concreto: tamaño de partícula, porosidad, contenido de humedad, tipo de cementante (presencia de puzolanas), relación agua/cementante, y calidad del concreto y aplicaciones.*

Artículo denominado “Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete Prepared with recycled aggregates”, Kou Shi-Cong ^{a, b}, Zhan Bao-jian ^a, Poon Chi-Sun ^a, School of Civil Engineering, publicado el 20 de septiembre 2013.

El artículo presentó los resultados de un estudio experimental sobre las propiedades del concreto elaborado con agregado reciclado de mortero (RMA) que ha sido modificado mediante un método de curado con CO₂. La investigación experimental se llevó a cabo en dos partes. En primer lugar, se determinaron las propiedades de densidad y absorción del CO₂ en los RMA. En segundo lugar, se evaluaron la propiedades de durabilidad, resistencia a la compresión y tracción, contratación por secado y penetrabilidad del ion cloruro en los concretos elaborados con RMA y curados con CO₂.

Se encontró que la densidad incrementó y la absorción de agua disminuyó en comparación con las muestras de RMA no carbonatadas. Además, los especímenes de RMA carbonatados, exhibieron un mejor desempeño en cuanto a las propiedades mecánicas y de durabilidad, como la resistencia a la penetración del ion cloruro y contracción al secado, en comparación con los RMA no carbonatados (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013).

- *Los resultados fueron alentadores y mostraron que el RMA curado con CO₂, puede ser utilizado para producir concreto estructural con la durabilidad y propiedades similares a las de un concreto con agregado natural.*

Artículo denominado “Recycled aggregates (RAs) for roads”, J. R. Jiménez, University of Córdoba, Spain, publicado 2013.

“En este artículo se presentaron las principales propiedades físico-químicas y mecánicas de los agregados reciclados (AR), generados en los residuos de construcción y demolición (CDW), que son factibles para utilizar como mezclas en capas de rodadura, bases y sub bases. La limitación de las propiedades para cada una de estas aplicaciones fueron identificadas, generando recomendaciones, como el desempeño ambiental y su capacidad de soportar carga.”

Las conclusiones a las que se llegó después de realizar esta investigación fueron las siguientes:

“Los Agregados Reciclados (AR) son una alternativa en carreteras con intensidades de tráfico medio y bajo, dependiendo de su composición y calidad. El AR se puede utilizar como mezcla en carpetas asfálticas, base y sub-base. Sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, difieren de las convencionales, lo que requiere un desarrollo normativo que favorezca su uso en la construcción de carreteras, cuya participación todavía es muy baja en algunos países subdesarrollados.

De acuerdo a la literatura, la resistencia a la fragmentación, compuestos de azufre y sales solubles han sido identificados como el limitante para su uso; ya que los AR sobrepasan los límites establecidos por diferentes normas, en cuanto a contenido de impurezas, como los compuestos de azufre, sales y yeso, las cuales disminuyen la estabilidad y capacidad de soporte. Por esta razón, se deben realizar trabajos futuros para mejorar estas limitantes y masificar su uso en carreteras de primer orden (Jiménez, 2013).

Los anteriores resultados muestran beneficios prometedores en el desarrollo de la investigación propuesta, ya que existe un campo por desarrollar en los Agregados Reciclados de concreto (ARC) y su aplicación en vías.

En el ámbito científico local encontramos el trabajo de investigación desarrollado por el ingeniero Néstor Raúl Bojacá Castañeda en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en el año 2013.

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto en la resistencia mecánica y en la durabilidad del concreto producido por el remplazo en diferentes porcentajes del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado, mediante ensayos en probetas y en un elemento estructural, (Bojacá Castañeda, 2013).

El informe consistió en comparar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción y densidad, coeficiente de forma, desgaste en máquina de los ángeles y micro deval. Luego se comparó el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de 20% y 40 % de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional.

Se utilizó la cámara de carbonatación con el objetivo de exponer el concreto a un ambiente con mayor concentración de CO₂ que la natural para luego medir el avance del frente de carbonatación.

Las conclusiones a las que se llegó después de realizar esta investigación fueron las siguientes:

- *El agregado reciclado proveniente de la trituración de concreto comparado con el agregado natural, presenta mayor absorción, menor densidad (aparente y nominal), menor coeficiente de forma y menor resistencia al desgaste en la*

máquina de los ángeles y en el ensayo Micro Deval, lo cual coincide con los autores consultados.

- Reemplazos de hasta 40% de agregado grueso reciclado por agregado natural no producen disminución de las propiedades mecánicas del concreto; la resistencia a compresión de concreto con 40% de reemplazo fue similar a la de la muestra de control, mientras que la de concreto con 20% de reemplazo fue ligeramente superior. Los resultados de módulo elástico no son concluyentes, pero se puede afirmar que no hay disminución de éste. En flexión, el concreto con 20% de reemplazo tuvo un módulo de rotura similar a la muestra control, mientras que hubo una disminución de un 10% para concreto con 40% de reemplazo.*
- En cuanto a ensayos de durabilidad, se encontró que el reemplazo de agregado reciclado no produjo deterioro en las propiedades y por el contrario, mejoraron ligeramente; en el ensayo de permeabilidad a cloruros a 28 días, la permeabilidad del concreto con agregado reciclado fue similar a la del concreto control, mientras que a 56 días, el concreto con 40% de reemplazo tuvo una permeabilidad 18% inferior a la del concreto de control. En cuanto a carbonatación, la resistencia del concreto con agregado reciclado fue ligeramente superior a la del concreto control. Finalmente, los ensayos ISAT y de sortividad dieron resultados similares.*

Cabe aclarar que las comparaciones en este caso correspondieron a agregados naturales con respecto a los agregados reciclados. En la presente investigación se compararon además los agregados reciclados de concreto carbonatados óptimos.

Además de lo anterior encontramos el trabajo de investigación desarrollado por el ingeniero Jorge Laverde en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en el año 2014.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento del concreto con diferentes porcentajes de agregado de concreto reciclado, mediante la valoración de algunas de sus propiedades eléctricas, y tratar de establecer la correlación con propiedades mecánicas y de durabilidad de este material (Laverde, 2014).

Investigación que podemos resumir de la siguiente manera “El trabajo de grado tuvo como finalidad evaluar el comportamiento del concreto con reemplazo de agregado grueso por agregados de concreto reciclado (ACR); dicho comportamiento se evaluó mediante la valoración de algunas de las propiedades eléctricas, mecánicas y de durabilidad de las mezclas hechas con este material. El ACR usado en las diferentes mezclas de los ensayos, fue producido a partir de la trituración de probetas de concreto las cuales habían sido ensayadas en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Se evaluaron 8 diferentes mezclas con cuatro contenidos diferentes de agregados reciclado (0 %, 25 %, 50 % y 100 %) y dos valores de relación agua/cemento (0,5 y 0,6). Dentro de las propiedades analizadas están la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistividad, impedancia, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad al ion cloruro, carbonatación y sortividad.

Los resultados de los ensayos indicaron claramente que en las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión son más bajos que para concretos con agregado natural. La resistencia a

la compresión de un concreto con 100% de ACR tiene una reducción estimada del 20% al 25%, con respecto a un concreto convencional. Paralelamente las propiedades eléctricas y de durabilidad medida mediante ensayos de resistividad, impedancia, sortividad y permeabilidad al ion cloruro, se ven afectadas con el aumento del porcentaje de agregado reciclado y la relación agua/cemento”.

Las conclusiones a las que se llegó después de realizar esta investigación son las siguientes:

- *“Las causas que inciden en la reducción de la resistencia a la compresión de concretos con ACR, son las propiedades del ACR, así como su cantidad en la mezcla. Sin embargo hasta ciertos porcentajes de reemplazo es viable el reemplazo de este tipo de agregados en el concreto. Un concreto con un reemplazo de agregado natural por ACR hasta el 25 %, tiene un comportamiento similar al del concreto convencional, como se pudo comprobar en este estudio ya que la reducción de la resistencia a la compresión es tan solo el 10 %, lo que implica que es viable su uso en el país”.*
- *“Es importante conocer las propiedades de los ACR, entre ellos su absorción, densidad, contenido de contaminantes, contenido de mortero adherido y resistencia a la abrasión, ya que estos factores inciden en la resistencia a la compresión del concreto. Con una clasificación adecuada de estos ACR y la creación de normas técnicas tanto para estos agregados como para los concretos, se podría implementar en el país el uso del concreto con ACR, ayudando al desarrollo sostenible al reducir la carga contaminante en las escombreras y los impactos negativos generados por la producción y transporte de agregados naturales. Ya en otros países se han establecido especificaciones tanto para ACR como para concretos con ACR que han sido satisfactorias”.*

6. MARCO TEÓRICO

6.1. AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO (ARC)

Los Agregados Reciclados de Concreto (ARC) son residuos pétreos derivados de la demolición de obras civiles. Debido a la creciente cantidad de residuos de construcción se empezaron a plantear aplicaciones para reutilizar estos materiales provenientes de la construcción y demolición.

En una planta de reciclado es posible tratar los residuos del concreto dando lugar a un material secundario llamado “agregado de concreto reciclado” (Adserà Sáez, 2008) o comúnmente llamado en nuestro medio “agregado reciclado de concreto” o ARC. Dicho material viene de un material primario, el Concreto, que tiene una composición heterogénea (cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones), por lo tanto, no se puede considerar como un material uniforme. Estos agregados conservan cierta cantidad de pasta de mortero adherido al agregado, presentando gran capacidad de absorción. Pueden contener otros materiales que pueden ser considerados impurezas, tales como yeso, madera, vidrio, plástico y metales (Jiménez, 2013).

La limpieza, las técnicas de procesamiento, la calidad del concreto y el origen de los residuos, hacen que la calidad de los ARC sea muy heterogénea. A continuación se presentan algunas de las propiedades típicas de los agregados reciclados:

Propiedades de los agregados reciclados.

- Composición: Depende principalmente de la fuente de los residuos, la técnica de demolición utilizada y el proceso de tratamiento en planta de reciclaje.
- Granulometría: Varía según el proceso de trituración, pero se puede seleccionar de acuerdo a los martillos que se utilicen. Se puede obtener entre un 70% y 90% de agregado del total procesado. La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los rangos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de agregado grueso en concreto estructural (Etxeberria, Miren et al., 2003).
- Porcentaje de Finos: Varía según las partículas de mortero que se desprenden en el proceso de trituración, por lo general son el 1% del proceso establecido por la EHE, y evaluados según estándares españoles (Adserà Sáez, 2008). La presencia de finos en el ARC puede generar problemas de adherencia y aumento de cantidad de agua.

Se recomienda un límite más alto de finos para el ARC, admitiendo entre un 2% y un 5%, favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación, de acuerdo con estándares internacionales (Etxeberria, Miren et al., 2003).

- Mortero adherido: Este material en el ARC hace que tenga menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a heladas, a reacción álcali-agregado y ataque de sulfatos, entre otros, al compararse con los agregados naturales. Esto afecta negativamente al Concreto en la medida del aumento en cantidad del mortero adherido.
- Densidad y absorción: La densidad es inferior que en un agregado natural, por la pasta de cemento adherida; oscila entre 2.100 y 2.400 kg/M³ y la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/M³, considerándose como agregados de densidad normal (Etxeberria, Miren et al., 2003), de acuerdo a procedencia y calidad del concreto original.

La absorción es la propiedad que presenta mayor diferencia, debido a la pasta de cemento adherida, entre 4 % y 10 %, superando el límite de 5 %.

- Relación humedad-densidad (compactación): Las diferencias en la densidad seca máxima y humedad óptima son atribuibles a diferentes densidades de las partículas y absorción de agua. La determinación de valor de densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad es más difícil de medir en los ARC que en los agregados naturales, debido a la mayor heterogeneidad de los componentes, así como la rotura de partículas más suaves durante la compactación (Jiménez, 2013).
- Tamaño de partícula: A menor tamaño de fracción de ARC se tiene menor densidad y mayor absorción, en un mismo concreto. La gradación de los ARC indica mayores oportunidades para las interacciones entre las partículas y la capacidad para tener un mejor grado de compactación (Jiménez, 2013).
- Forma de las partículas: Partículas planas y alargadas tienen una tendencia a fracturarse a lo largo de su dimensión estrecha durante la compactación, ya que tienden a impedirla y hacer que sea más difícil conseguir una densidad de material especificado. Como los ARC se obtienen del prensado de grandes piezas de escombros, se generan gran número de caras fracturadas. Lo anterior hace que exista un alto ángulo de fricción interna. En ARC se tiene más de 70% (Jiménez, 2013). Sin embargo, este parámetro no es una propiedad limitante.
- Resistencia a la fragmentación: Se determina con el coeficiente de abrasión en máquina de los ángeles. La mayoría de los ARC tienen un valor de coeficiente menor del 40%, por lo que se podría utilizar como material en la capa estructural de pavimentos. Sin embargo, el coeficiente aumenta cuando el porcentaje de mortero adherido es alto, lo que significa que si los ARC tienen un contenido de mortero adherido inferior al 44% no cumple con el límite máximo de la máquina de los Ángeles que es de 40%. Deben tener una densidad relativa aparente mayor que 2.160 Kg/M³ para la fracción gruesa y agua absorción de menos de 8% (Sánchez y Alaejos, 2009) (Jiménez, 2013).
- Calidad del concreto original: En los concretos de altas resistencias, se suelen obtener agregados reciclados de mejor calidad, con mayor densidad y menor absorción.

- Técnicas de procesado: Aumentando los ciclos de trituración se elimina mayor contenido de mortero, mejorando calidad del ARC, disminuyendo la absorción y aumento de la densidad, pudiendo alcanzar los valores de un agregado natural.
- Impurezas o contaminantes presentes: Los ARC pueden contener otros materiales que pueden ser considerados impurezas, tales como yeso, madera, vidrio, plástico y metales. Además, pueden venir contaminados con sulfatos y cloruros dependiendo de la exposición del concreto de donde proceden. Los cloruros pueden acelerar el fraguado y corroer el refuerzo. Los sulfatos reaccionan con el C_3A causando daños y manchando el concreto. Los cloruros y sulfatos pueden ocasionar la degradación de la pasta de cemento, perdiendo su capacidad aglomerante.

6.2. DESEMPEÑO DE LOS ARC EN MEZCLAS DE CONCRETO PARA VÍAS

La sustitución de materiales naturales por ARC es una alternativa viable para las carreteras. Los ARC se pueden utilizar en capas estructurales (bases y sub-bases) como materiales no consolidados o tratadas con cemento en función de su composición y calidad. Los materiales reciclados no son susceptibles a cualquier erosión o cambios físicos o químicos apreciables en sus ciclos de vida, independientemente de su aplicación. Se pueden utilizar como materiales de carreteras con tráfico diario promedio bajo a medio (Jiménez, 2013).

Se pueden utilizar como materiales de sub-base y base; basado en el estado actual del conocimiento, no se recomienda el uso con más del 20% de reemplazo parcial en contacto con la capa de rodadura (asfalto o concreto). Se debe limitar el contenido de partículas de yeso y deben estar libres de terrones de arcilla o materia extraña, además deben ajustarse a la curva granulométrica por especificación, siendo recomendable comprobar sus características después del proceso de compactación (Jiménez, 2013).

Sus propiedades físico-mecánicas y químicas difieren de las de los agregados naturales, lo que requiere el desarrollo de normas específicas que favorezcan el uso de estos materiales y permitan un mayor uso de material reciclado en la construcción de carreteras, el cual todavía es muy bajo en países desarrollados.

6.3. CONCRETOS CON ARC

Los concretos que contienen Agregados Reciclados de Concreto poseen propiedades diferentes a las de una mezcla de concreto convencional, debido principalmente al contenido de mortero adherido y al porcentaje de sustitución de agregados en la mezcla (Adserà Sáez, 2008). A continuación se presentan algunas recomendaciones y propiedades de acuerdo a diferentes estudios sobre Concretos con ARC.

Dosificación de concretos con ARC.

- La cantidad de agua con el fin de llegar a la consistencia requerida, se logra realizando dosificaciones previas, lo mismo que la relación a/c buscando la resistencia pretendida y la relación entre agregado fino y grueso para alcanzar la cohesión del concreto fresco (Adserà Sáez, 2008).
- El agua debería ser de 5% a 10% mayor que en el concreto convencional, con el fin de conservar la manejabilidad (Adserà Sáez, 2008).
- De acuerdo a lo anterior se requiere una mayor cantidad de cemento (Etxeberria, Miren et al., 2003).
- La curva granulométrica de referencia para el agregado reciclado es la misma que para el agregado convencional (Adserà Sáez, 2008).
- Se debe tener especial cuidado con las bajas densidades del agregado reciclado (originadas por el mortero adherido), cuando se esté realizando la dosificación en peso (Etxeberria, Miren et al., 2003).
- Por el alto grado de absorción, los agregados reciclados deben estar húmedos, para que no absorban agua de la dosificación de diseño, lo que generaría una pérdida de trabajabilidad, influyendo en la relación a/c y por ende en la resistencia de la mezcla (Etxeberria, Miren et al., 2003).
- Con el aumento de la cantidad de cemento de 325 a 345 kg/m³ en el concreto hecho con 50% de agregados secos reciclados, se encontró que la resistencia a la compresión observada es similar a la del concreto convencional. Debido a que los agregados secos son porosos, el agua se elimina de la mezcla y la relación a/c efectiva se hace más baja, lo que aumenta la rigidez de la mezcla y la resistencia mecánica. (Adem Ait, Karim, Abdelkader, & M'Hamed, 2016).

Propiedades de concreto con ARC.

Con una misma dosificación, las propiedades del concreto con ARC son afectadas negativamente si se compara con un concreto convencional. El módulo de elasticidad y las resistencias pueden reducirse, la retracción y fluencia pueden aumentar. En términos generales, la permeabilidad es más alta, se tiene mayor capacidad de succión y menor resistencia a la exposición a temperaturas altas (Adserà Sáez, 2008). Este comportamiento se atribuye al mortero adherido al agregado, y se acentúa más si se aumenta el porcentaje de ARC (Adserà Sáez, 2008).

Propiedades en estado fresco.

Como el ARC tiene una alta absorción, durante la mezcla una parte del agua será tomada por los agregados, lo que produce aumento considerable en la consistencia y una disminución en la relación a/c (Etxeberria, Miren et al., 2003).

El aumento del agua necesaria se da entonces por la mayor absorción de los ARC y también a la nueva granulometría de los agregados, por la presencia de finos generados durante la mezcla. Puede influir también su forma angular y su textura rugosa (Etxeberria, Miren et al., 2003).

La trabajabilidad se pierde más rápidamente, ya que incluso después de la mezcla el ARC sigue absorbiendo agua (Etxeberria, Miren et al., 2003).

Propiedades en estado endurecido.

- **Resistencia.**

Con una misma relación a/c la resistencia se disminuye, en la medida de mayor sustitución de agregados naturales por agregados reciclados. El aumento de la porosidad disminuye la resistencia a la compresión del concreto (Adserà Sáez, 2008).

La sustitución de agregado fino natural por fino reciclado, genera sustanciales pérdidas en las propiedades mecánicas del concreto, solo se examina la sustitución de agregado grueso para evaluar la disminución de la resistencia (Adserà Sáez, 2008).

Cuando se disminuye la relación a/c la resistencia del concreto aumenta, ya sea reciclado o convencional. En los concretos reciclados además de la relación a/c, se debe tener en cuenta la procedencia y calidad del ARC, que influye en la resistencia (Otsuki, 2003).

Lo anterior indica que las mezclas elaboradas con ARC provenientes de concretos de baja calidad, resultan en concretos reciclados de baja resistencia, cuyas propiedades son difíciles de mejorar, aun disminuyendo la relación a/c. Por el contrario si se obtiene un ARC proveniente de un concreto de alta calidad, la futura mezcla puede alcanzar la resistencia del concreto de origen (Otsuki, 2003).

Las principales propiedades del concreto reciclado dependen básicamente de la calidad del concreto de origen, no de la cantidad del mortero adherido (Otsuki, 2003).

- **Porosidad, absorción y permeabilidad.**

El uso de ARC aumenta la porosidad del concreto reciclado, al igual que su absorción y permeabilidad, aunque depende también de la nueva matriz cementante. Esto influye directamente en la durabilidad.

El coeficiente de absorción se incrementa de acuerdo a la porosidad del ARC y del porcentaje de sustitución, variando entre 15% y 70% respecto al concreto convencional (Mulheron & O'mahony, 1988).

El aumento de la porosidad en estos casos es de 1,5 a 2 veces mayor que la del concreto de control. La permeabilidad es de 2 a 3 veces mayor que la del concreto de control (Barra & Vázquez, 1996).

- **Resistencia a altas temperaturas.**

En los concretos reciclados se tienen poros de mayor tamaño y con el efecto de las altas temperaturas se engrandecen todavía más, lo que lo hace tener una mayor pérdida de resistencia que un concreto convencional (Barra & Vázquez, 1996).

- **Carbonatación.**

En pequeñas cantidades de ARC que provengan de concretos de buena calidad, se pueden mantener las profundidades de carbonatación similares al concreto

convencional. Para sustituciones elevadas se puede sobrepasar (Song & Kwon, 2007).

Si los ARC se utilizan para la fabricación de concreto reforzado, la carbonatación induciría corrosión en el acero de refuerzo (Jerga, 2004).

El objetivo de esta investigación consiste en el mejoramiento de las propiedades de los ARC, utilizando la técnica de carbonatación acelerada. Se cree que induciendo la carbonatación de los agregados reciclados previamente a la fabricación del concreto, puede resultar en una importante mejora de la permeabilidad del concreto reciclado (Adserà Sáez, 2008).

6.4. TECNOLOGÍA DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CAD), POR MEDIO DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Con el fin de evaluar la resistencia a la carbonatación, se utilizan ensayos acelerados porque la carbonatación en condiciones naturales es un fenómeno lento desde el punto de vista técnico. Durante ensayos acelerados, las muestras de concreto se someten a una concentración de CO₂ mucho mayor que la concentración en el aire ambiente (Turcry, Oksri-Nelfia, Younsi, & Aït-Mok, 2014).

Factores que controlan la carbonatación

- **Humedad.**
La humedad relativa óptima para una óptima velocidad de carbonatación debe estar en el rango de (50 – 60) % (Nordic Innovation Centre, 2005).
- **Porosidad.**
La porosidad del concreto es un factor de control importante, que influye en la difusión de los iones y el CO₂. En general, con una baja relación agua / cemento se obtienen productos de baja porosidad, los cuales se carbonatan más lentamente.
- **Temperatura.**
El proceso de carbonatación aumenta al aumentar la temperatura (Nordic Innovation Centre, 2005).
- **La calidad del concreto.**
Como se mencionó anteriormente, una baja relación a/c, disminuirá la carbonatación debido a la porosidad del concreto. También, debe tenerse en cuenta el grado de hidratación del concreto, ya que este afecta la porosidad.

Por otra parte, cuando se tritura concreto de alta resistencia, se obtiene una distribución más uniforme de la pasta de cemento en los diferentes tamaños de grano. (Nordic Innovation Centre, 2005).

- **Tamaño de partícula**

La velocidad de carbonatación es más rápida después de la demolición, en comparación con la vida de servicio del concreto. Esto se debe, a que durante el proceso de demolición, se incrementa el área superficial de las partículas de concreto, aumentando así el área de carbonatación. Es decir, que entre menor sea el tamaño de las partículas del concreto, mayor será su tasa de carbonatación., (Nordic Innovation Centre, 2005).

- **La presión parcial de CO₂**

El aumento de la presión parcial de CO₂ aumentará la velocidad de carbonatación, marcando la diferencia en la aplicación de estos materiales, que pueden utilizarse como base para carreteras o como material de relleno. (Nordic Innovation Centre, 2005).

- **Efectos de puzolanas.**

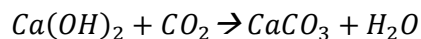
Los estudios han demostrado, mayores velocidades de carbonatación del concreto elaborado con cenizas volantes o humo de sílice (Nordic Innovation Centre, 2005).

- **Entorno externo.**

Además de la presión de CO₂, el concreto triturado es altamente dependiente del escenario de aplicación. Por ejemplo, cuando los ARC se utilizan como material de relleno o como base en vías, se debe tener en cuenta las condiciones de saturación de la zona, ya que estas afectan el proceso de carbonatación y lixiviación de los compuestos de calcio (CaOH) (Nordic Innovation Centre, 2005).

6.5. REACCIONES QUÍMICAS DURANTE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN

La carbonatación produce una reacción en la fase acuosa, esto significa que el CO₂ debe disolverse en agua para reaccionar con el Calcio y para formar carbonato de calcio, (Nordic Innovation Centre, 2005), como se muestra a continuación:



De acuerdo a (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014), la carbonatación se puede dividir en tres etapas: (1) Difusión de CO₂ en los poros de la estructura de la pasta de cemento. (2) La disolución del sólido Ca(OH)₂ y el C-S-H (Silicato de calcio hidratado) de la pasta de cemento. (3) La reacción de CO₂ disuelto y Ca²⁺ formando carbonato de calcio CaCO₃.

Cuando todo el Ca (OH)₂ se ha disuelto y precipitado como CaCO₃, el Silicato de calcio hidratado (C-S-H) libera iones de Ca con el fin de mantener el pH. Con un continuo acceso de CO₂ el C-S-H comienza a disolverse y finalmente el pH empieza disminuir, (Nordic Innovation Centre, 2006).

7. PROGRAMA EXPERIMENTAL - METODOLOGÍA

A continuación se presenta el programa experimental desarrollado en el proyecto, el cual fue ejecutado en tres etapas, las cuales fueron desarrolladas de la siguiente manera:

- En la primera etapa se evaluaron algunos parámetros del proceso de carbonatación acelerada y la influencia del contenido de humedad de los ARC en el proceso de carbonatación para determinar los parámetros óptimos de fijación de CO₂ al ARC en la cámara de carbonatación.
- En la segunda etapa se caracterizaron los ARC carbonatados óptimos comparando sus propiedades con relación a agregados naturales y ARC no carbonatados, verificando el cumplimiento o no de los requisitos establecidos en norma INVIAS 2013 sección 200 “agregados pétreos”.
- Por último y como tercera etapa se desarrollaron 7 mezclas de concreto para ensayos de resistencia a la compresión y cálculo de módulos de elasticidad y rotura, verificando cumplimiento respecto a norma INVIAS 2013 “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” Capítulo 5 – Pavimento de Concreto.

Para el desarrollo del programa experimental se utilizaron 3 tipos de materiales gruesos (tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ”), agregado natural (cantera), Agregado Reciclado de Concreto (ARC) del cual un porcentaje fue sometido al proceso de carbonatación acelerada y lo denominamos ARC Carbonatado.

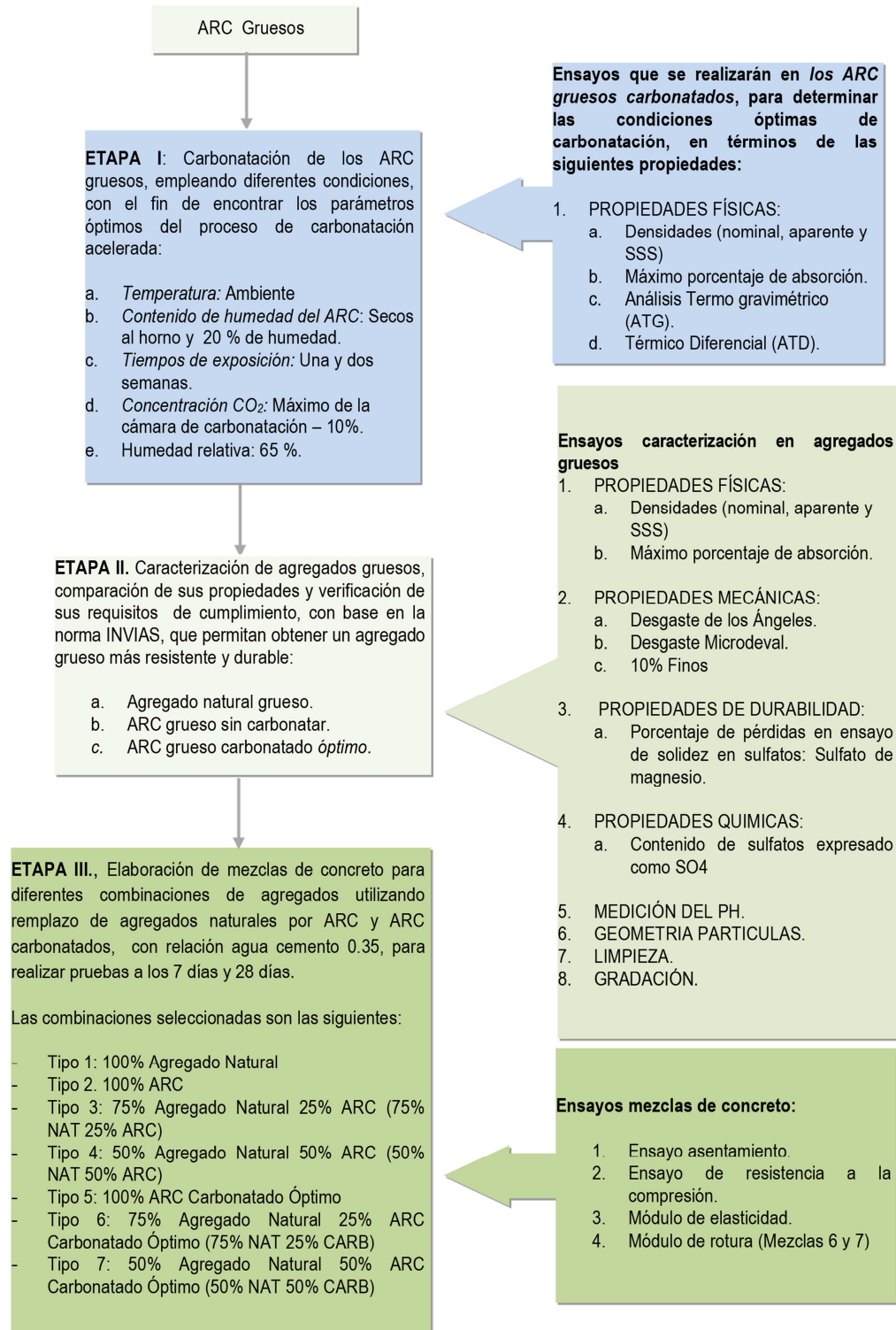
Los ARC fueron obtenidos producto de la trituración y tamizaje de cilindros de concreto con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ”, el proceso de trituración y tamizaje fue realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería; los cilindros triturados eran de procedencia conocida, posteriormente el material fue almacenado hasta su uso en canecas selladas para evitar la alteración por parte de agentes atmosféricos.

Las variables controladas y medidas en el proceso de carbonatación acelerada de la etapa 1 que permitieron obtener la fijación óptima CO₂ en la cámara de carbonatación fueron, temperatura, humedad, tiempo de exposición, concentración de CO₂ y humedad relativa.

Los ensayos seleccionados y realizados en el programa experimental de la etapa 2 buscaron identificar y comparar el comportamiento de los Agregados Naturales Gruesos, ARC Gruesos sin Carbonatar y ARC Carbonatados Óptimos, en cuanto a propiedades físicas, mecánicas, químicas y durables, así como el cumplimiento de norma para agregados.

En la etapa 3 los ensayos seleccionados buscaron determinar si las mezclas realizadas cumplían los requerimientos especificados en norma INVIAS en cuanto a resistencia a la compresión, asentamiento, módulo de flexión y rotura. Todo lo anterior se puede ver representado mediante el esquema de la Figura 1.

Figura 1. Etapas para el Desarrollo de Trabajo de Grado
PROGRAMA EXPERIMENTAL - METODOLOGIA



Fuente: Propia.

En la Tabla 1 se indican los ensayos que permiten realizar una caracterización de los agregados gruesos naturales, ARC y ARC carbonatados, comparando sus propiedades y verificando requisitos de cumplimiento con base en norma INVIAS, permitiendo determinar su comportamiento respecto a dureza, durabilidad, limpieza, características químicas y físicas, para su utilización en vías.

Tabla 1. Ensayos en Agregados Gruesos para evaluar Viabilidad de Uso en Mezclas de Concreto para Vías.

PROPIEDAD	ENSAYO		NORMA
Granulometría	Gradación		NTC 77, ASTM C136 Ver Norma INVIAS artículo 630.2.2.2
DUREZA	Desgaste Los Ángeles	- En seco, 500 revoluciones %	INV 218
	Micro Deval, %		ASTM D-6928
	10 % de finos	Valor en seco, kN	BS 812 PART 111
		Relación húmedo/seco	
DURABILIDAD	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, %	- Sulfato de magnesio	INV E-220
	Reactividad álcali-agregado		ASTM C 1260 (En barras de mortero).
LIMPIEZA	Terrones de arcilla y partículas delezables, %		INV E-211
	Partículas livianas, %		INV E-221
GEOMETRÍA DE PARTÍCULAS	Partículas fracturadas mecánicamente %	- 1 cara - 2 caras	INV E-227
	Índice de aplanamiento, %		INV E-230
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Contenido de sulfatos expresado como SO_4		INV E-233
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Absorción de agua, % máximo		ASTM C127 Ver norma INV E-222
	Densidad aparente, nominal y en condición SSS		ASTM C127 (Agregado grueso)

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, Especificaciones IDU-ET-2005, Tabla 600.1: Requisitos del agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico, Bogotá 2005.

7.1. DETERMINACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC) GRUESO CARBONATADO ÓPTIMO

Para determinar el ARC grueso carbonatado óptimo se identificaron los factores que inciden en el entorno del proceso de carbonatación natural de los agregados, como son la temperatura, presión, humedad relativa, tiempo de exposición y concentración de CO_2 , (Nordic Innovation Centre, 2006). En este estudio se identificó que la capacidad del cemento para unirse al CO_2 y la velocidad de este proceso, dependen de las anteriores variables, incluyendo el tipo de concreto y su aplicación.

Para determinar cuáles son los parámetros que permiten la fijación óptima de CO₂ al agregado, se evalúa como criterio de decisión, los resultados de los ensayos de densidad y absorción, ya que el primero mide el aumento de la masa por unidad de volumen y si la masa aumenta en mayor proporción que otras combinaciones de parámetros nos indica que tuvo mayor fijación de dióxido de carbono durante el proceso de carbonatación acelerada. De otra parte si el resultado del ensayo de absorción es menor en incremento de masa, debido a la penetración de agua en los poros de sus partículas, nos indica que disminuyó la penetración de agua por acción de la fijación del CO₂.

Teniendo en cuenta lo anterior la combinación de parámetros durante el proceso de carbonatación acelerada de los Agregados Reciclados de Concreto que indiquen una mayor densidad y una menor absorción, corresponden a los parámetros óptimos de fijación de dióxido de carbono a la muestra, convirtiendo este material en el ARC Carbonatado óptimo, el cual es objeto de estudio y análisis de su comportamiento en este trabajo de grado.

7.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

A continuación se presentan los requisitos de las propiedades típicas que deben ser verificadas en su cumplimiento normativo; las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) del año 2013, en el Artículo 500, Pavimento de Concreto Hidráulico, se indican los requisitos que deben cumplir los agregados, ver Tabla 2. Además se indica que los agregados gruesos se deben ajustar a alguna de las granulometrías indicadas en la Tabla 3.

Las siguientes son las abreviaturas o designaciones dadas a cada uno de los agregados utilizados en el desarrollo de este trabajo de grado:

- a. Agregado natural grueso.
- b. ARC grueso sin carbonatar.
- c. ARC grueso carbonatado óptimo.

Tabla 2. Tabla 500-4 Requisitos del Agregado Grueso para Pavimentos de Concreto Hidráulico.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	30

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	90 75
Durabilidad (O)		
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	10 15
Limpieza (F)		
Terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	3
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	0.5
Geometría de las partículas (F)		
Partículas fracturadas mecánicamente (una cara), mínimo (%)	E-227	60
Partículas planas y alargadas (relación 5:1), máximo (%)	E-240	10
Características químicas (O)		
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como $SO_4^{=}$, máximo (%)	E-233	1.0
Reactividad álcali - agregado grueso y fino: Concentración SiO_2 y reducción de alcalinidad R Nota: ver numeral 500.2.1.5.3	E-234	$SiO_2 < R$ cuando $R > 70$ $SiO_2 < 35 + 0.5R$ cuando $R < 70$

Fuente: Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de Construcción 2013.

Tabla 3. Tabla 500-3 Granulometrías Agregado Grueso Pavimentos en Concreto Hidráulico.

TIPO DE GRADACIÓN		TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
		63.0	50.0	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36
		2½"	2"	1½"	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No.8
		% PASA								
AG 1	Fracción 1: 2 ½" a 1"	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
	Fracción 2: 1 ½" a No.4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5
AG 2	Fracción 1: 2" a ¾"	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
	Fracción 2: 1" a No. 4	-	-	-	100	90-100	-	20-5	0-10	0-5
AG 3	1 ½" a No. 4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Fuente: Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de Construcción 2013.

7.2.1. Propiedades Físicas.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades físicas del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación en propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.1.1. Densidades (nominal, aparente y SSS) y Absorción.

Este ensayo se realiza de acuerdo con los requisitos estipulados en las Normas de Ensayo de Materiales (Instituto Nacional de Vías, 2013) INV E-223-13. Los resultados de este ensayo fueron utilizados para definir los parámetros óptimos del proceso de carbonatación acelerada de la primera etapa del presente proyecto, ya que el ARC de mayor Densidad y menor Absorción indicaba el mejor parámetro del proceso.

Igualmente, los resultados de la densidad SSS y % de absorción fueron utilizados como datos de entrada en el diseño de mezcla con los diferentes % de remplazo en las mezclas.

Figura 2. Ensayo de Densidad y Absorción (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.2. Granulometría.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de gradación del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.2.1. Gradación.

Los tres tipos de agregados se pasaron por la serie de tamices, para conocer el tamaño de las partículas de los mismos (Figura 3).

La granulometría permite determinar la distribución y porcentaje de las partículas, respecto a su tamaño, mediante el paso de las muestras por una serie de tamices con diferentes aberturas de malla.

Figura 3. Gradación de Agregados.



Fuente: Propia.

7.2.3. Propiedades de Dureza.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de dureza del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.3.1. Desgaste Maquina de los Ángeles.

Este ensayo se realiza de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma INV E-218-13 resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores a 1 ½" por medio de la Máquina de los Ángeles (Figura 4).

El objeto de realizar este ensayo es conocer el comportamiento de los tres tipos de agregado a la degradación física, resultado de una combinación de abrasión, impacto y molienda, a unas revoluciones y con una determinada cantidad de esferas de acero

Figura 4. Ensayo de Máquina de los Ángeles (Agregados)



Fuente: Propia.

7.2.3.2. Desgaste Utilizando el Aparato Micro-Deval.

El ensayo INV E-238-13 permite determinar la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval (Figura 5).

El ensayo Micro Deval es un indicador de resistencia a la abrasión e indicador de durabilidad del agregado pétreo ante la presencia de abrasión por medio de esferas de acero en presencia de agua.

Figura 5. Ensayo Micro Deval (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.3.3. 10% de Finos.

El ensayo INV E-224-13, permite determinar el valor del 10% de finos presentes en los agregados (Figura 6).

Este procedimiento indica la resistencia mecánica de un agregado grueso cuando es sometido a un esfuerzo de compresión, teniendo en cuenta que los materiales granulares en los pavimentos están sometidos a esfuerzos por acción de las cargas del tránsito, razón por la cual es importante que los materiales soporten estas cargas sin desintegrarse. Este ensayo presenta un indicador de comportamiento del agregado frente a la degradación mecánica.

Figura 6. Ensayo 10% de Finos (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.4. Propiedades de Durabilidad.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de durabilidad del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.4.1. Pérdidas en Ensayo de Solidez en Sulfatos.

El ensayo INV E-220-13, permite evaluar la solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (Figura 7).

Este ensayo determina la resistencia de los agregados pétreos a la acción de agentes atmosféricos agresivos, como ciclos de humedecimiento y secado, ataque por sulfatos, cuando estos se encuentran expuestos a la intemperie, siendo un indicador de referencia del comportamiento del agregado cuando no se tienen antecedentes de su comportamiento.

Este grado de resistencia se determina por medio de la inmersión repetida del agregado en solución saturada de sulfato de sodio.

Figura 7. Ensayo de Sulfatos (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.5. Limpieza.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de limpieza del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.5.1. Terrones de Arcilla y partículas deleznales.

El ensayo INV E-211-13 Determina terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados, como se aprecia en la Figura 8.

Figura 8. Ensayo de Terrones de Arcilla (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.6. Geometría de Partículas.

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de geometría de partículas del

agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.6.1. Partículas Fracturadas Mecánicamente.

El ensayo INV E-227-13 permite hallar el porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (Figura 9).

Este ensayo proporciona un indicativo de la aceptabilidad de los agregados gruesos respecto a su resistencia al corte y fricción, razón por la cual es de suma importancia su definición en la construcción de capas de rodadura y mezclas de concreto hidráulico para vías.

Figura 9. Ensayo de Partículas Fracturadas (Agregados)



Fuente: Propia.

7.2.6.2. Índice de Aplanamiento y Alargamiento.

El ensayo INV E-230-13 permite encontrar Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras (Figura 10).

Este ensayo proporciona el porcentaje de partículas planas y alargadas de los agregados dando una medida de la trabajabilidad de una mezcla o cuan propensa a rotura y desintegración son estas partículas en el proceso de compactación, ya que la granulometría inicial se verá afectada.

Figura 10. Ensayo Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregados)



Fuente: Propia.

7.2.7. Características Químicas

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades químicas del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.7.1. Contenido de sulfatos expresado como SO_4

El ensayo INV E-233-13 permite determinar del contenido de azufre en los agregados pétreos. Este ensayo se desarrolló con la firma CONCRESERVICIOS (Figura 11).

Los resultados de este ensayo permiten determinar los contenidos de azufre en los agregados, los que generan en las mezclas eflorescencias, depósitos y expansiones en las estructuras de concreto, llevando a la degradación del concreto y la posterior destrucción de las obras.

Figura 11. Ensayo Contenido de Azufre (Agregados).



Fuente: Propia.

7.2.8. Otras Propiedades.

A continuación se presentan los ensayos previstos fuera de norma INVIAS para agregados pétreos, con el objeto de verificación de comportamiento de las propiedades termo gravimétricas y térmico diferenciales del agregado referencia (ARC Carbonatado).

Adicional a lo anterior se realizó el ensayo fuera de norma INVIAS para agregados pétreos, con el objeto de verificar el comportamiento del PH del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

7.2.8.1. Análisis Termo gravimétrico (ATG).

Se realiza el ensayo ASTM E1131 – 08 Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. Este ensayo se desarrolló en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

El ensayo de termo gravimetría nos indica la variación de la masa de una muestra cuando es sometida a un programa de temperatura en una atmosfera controlada con un gas inerte. La variación de la masa se indica en un porcentaje de pérdida o ganancia respecto a la masa inicial.

Las características de la muestra estudiada tenía una masa de 16,366 mg, el rango de temperatura del proceso varió entre la temperatura ambiente hasta 750°C, con tasa de aplicación de temperatura de 10°C por minuto, se utilizó nitrógeno para la atmosfera de ensayo con una aplicación de 50ml por minuto.

7.2.8.2. Térmico Diferencial (ATD).

Se realiza el ensayo ASTM D3418 – 99 Método de prueba estándar para análisis de la composición por medio de termo gravimetría. Este ensayo se desarrolló en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

El ensayo de análisis térmico diferencial registra la diferencia de temperatura entre la muestra de un material de referencia (térmico, física y químicamente inerte) en función del tiempo y de la temperatura, cuando una muestra se somete a un programa de temperatura en una atmosfera controlada, el resultado de este ensayo es cualitativo ya que indica la temperatura a la cual existe un cambio energético en la muestra, ya sea endotérmico y exotérmico.

Las condiciones de ensayo son: tamaño de la muestra 12,1 mg, el rango de temperatura varió desde la temperatura ambiente hasta 450°C, con tasa de aplicación de temperatura de 10°C por minuto, se utilizó nitrógeno para la atmosfera de ensayo con una aplicación de 50ml por minuto.

7.2.8.3. Medición de pH.

Se realiza el ensayo INV E-131-13 para evaluar el pH de suelos. Este ensayo se desarrolló con la firma CONCRESERVICIOS (Figura 12).

El ensayo de PH en los agregados en estudio determina el grado de acidez o alcalinidad de muestras de material de cada uno de los agregados en estudio suspendidas en agua y en una solución de 0.01 M de cloruro de calcio. Esta variable es útil en la determinación de la reacción del agregado con el cemento en la mezcla de concreto y de la movilidad de los iones en la mezcla.

Figura 12. Ensayo de PH (Agregados).



Fuente: Propia.

7.3. ENSAYOS MEZCLAS DE CONCRETO

A continuación se presentan los ensayos previstos dentro de norma INVIAS 2013 “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” Capítulo 5 – Pavimento de Concreto, para verificación de cumplimiento de las propiedades de asentamiento, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y módulo de rotura en mezclas de concreto con los tres tipos de agregado en estudio.

7.3.1. Asentamiento.

Se realiza el ensayo INV E-403-2013 Asentamiento de concreto de cemento hidráulico (Slump).

Este método cuantifica el asentamiento del concreto en estado fresco, el cual se incrementa proporcionalmente con el contenido de agua en una mezcla, pero dicho aumento se traduce en una reducción de la resistencia del concreto. Es un indicador de la manejabilidad de la mezcla y un parámetro de control respecto al diseño.

7.3.2. Resistencia a la Compresión.

Se realiza el ensayo INV E-410-13 Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto.

La importancia de este ensayo radica en que es un control de calidad al requerimiento de la resistencia solicitada en una estructura, el cual permite realizar verificaciones y ajustes en la dosificación de las mezclas, el proceso de mezclado y colocación del concreto, evalúa la efectividad de los aditivos y en general los componentes de la mezcla.

7.3.3. Módulo de Elasticidad.

Se realiza el ensayo INV E-424-13 Módulo de elasticidad estático y Relación de Poisson del concreto a compresión.

Este ensayo nos permite conocer la deformación de los concretos a ciertas cargas aplicadas identificando su módulo, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para el diseño de vías con pavimentos de concreto, teniendo en cuenta las deformaciones obtenidas en el ensayo.

7.3.4. Módulo de Rotura.

Se realiza el ensayo INV E-414-2013 Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.

Este ensayo determina la resistencia a flexión de las mezclas seleccionadas y su resultado determina el módulo de rotura. Con base en estos resultados se puede determinar el cumplimiento de especificación y la evaluación del concreto con destino a pavimento rígido.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados de los ensayos ejecutados dentro del programa experimental para cada una de las 3 etapas, incluido el análisis respecto al cumplimiento norma INVIAS y su comportamiento frente al material de referencia (ARC Carbonatado), llegando a identificar las fortalezas y debilidades del material de control en cada una las propiedades y etapas estudiadas.

8.1. DETERMINACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC) GRUESO CARBONATADO ÓPTIMO

Inicialmente se ingresaron muestras de ARC grueso a la Cámara de Carbonatación Acelerada con parámetros correspondientes a humedad de 65% con temperatura de 23°C y una concentración de CO₂ de 10%, cada 7 días se realizaron pruebas de densidad y absorción con el fin de definir los tiempos máximos de exposición, calibración de equipo y análisis de resultados versus lo indicado en la literatura estudiada literatura (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014).

Como se puede apreciar en la Tabla 4, los resultados indican que a través del tiempo los agregados sometidos a Carbonatación Acelerada aumentaron su densidad y disminuyeron su absorción. Lo anterior corrobora lo encontrado en la literatura (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014), indicando que los ARC reaccionaron como se esperaba ante este proceso. Resultado que es atribuible al CO₂ fijado durante el proceso en la cámara, como se indica en el estudio de (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013).

Tabla 4. Resultados de la Prueba - Ensayos de Absorción y Densidad.

Ensayo	Inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3
Absorción	9,40%	9,35%	7,78%	7,64%
Densidad Aparente (gr/cm ³)	2,13	2,16	2,20	2,21
Densidad Nominal (gr/cm ³)	2,30	2,37	2,43	2,45

Fuente: Propia.

Con la etapa de prueba se pudo determinar que el tiempo de exposición óptimo para la muestra de tamaño máximo ¾" corresponde a 15 días, ver Tabla 4. En la Figura 13 se presenta los agregados sometidos a la prueba de Fenolftaleína al 1% diluida en alcohol, la cual indica si los agregados están carbonatados o no; ellos presentan un color purpura indicando que no hay carbonatación. Como se puede ver en la imagen de la izquierda los agregados presentan una tonalidad incolora indicando que se carbonataron externamente e internamente, ya que fueron fracturados y al interior fue aplicada la fenolftaleína, en la cual se aprecia que no hay tonalidad al aplicar el químico. La imagen de la derecha es una muestra testigo no carbonatada.

Figura 13. Prueba de Fenolftaleína al 1%.



Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta lo anterior identificamos que el tiempo de exposición es directamente proporcional al tamaño máximo de la muestra, es decir, para el tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " se requirieron 15 días de exposición y para el tamaño de $1\frac{1}{2}$ " fue necesario exponer el material durante 30 días en la cámara de carbonatación acelerada.

Al revisar los parámetros de la cámara de carbonatación acelerada se identifica que la máxima concentración que se puede suministrar de CO_2 es del 10%, razón por lo cual se asigna este valor y se deja constante. Ver ANEXO B (Manual de la Cámara).

De la misma manera la humedad relativa es un parámetro constante, razón por la cual se asigna el 65% de Humedad Relativa, el cual de acuerdo con la literatura (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014) se encuentra dentro del rango para que se propicie la carbonatación.

Teniendo en cuenta que el fenómeno de carbonatación se presenta en ambientes con humedad, es decir ni completamente secos ni saturados, la temperatura fijada fue temperatura ambiente (23°C) con humedad relativa de 65%, parámetros que se dejaron constantes.

Una vez ejecutada la etapa de prueba y seleccionados los parámetros constantes se procedió a ejecutar la primera etapa del programa experimental en la cámara de carbonatación, con dos variables respecto al estado de humedad de la muestra en estudio: conteniendo un 20% de humedad y seco al horno (Figura 14), manteniendo constantes las otras variables como Temperatura, tiempo de exposición de 15 días calendario (ya definido en etapa de prueba), humedad relativa de 65% y concentración de CO_2 .

Figura 14. Ingreso de ARC a la Cámara de Carbonatación – Etapa 1.



Fuente: Propia.

Con la determinación de estos parámetros, se realizaron los ensayos de densidad y absorción a los 15 días indicando como resultado que la muestra seca al horno, ver tabla 5, con los demás factores constantes, es el material que mayor densidad y menor absorción presenta, ya que al realizar las pruebas, fijando los demás parámetros, se determinó que los ARC secos al horno presentaron un aumento en la densidad y una disminución en la absorción de 0,205%. Confirmándose previamente por medio de aplicación de fenolftaleína que se encontraba totalmente carbonatado al fracturar detritos del material, tal como se pudo apreciar en la Figura 13 imagen izquierda. Los formatos de laboratorio se incluyen en ANEXO A.

Tabla 5. Resultados de la Prueba de Absorción y Densidad.

Propiedad	ARC con W=20%	ARC Seco al Horno
Densidad Nominal (gr/cm3)	2,565	2,568
Densidad SSS (gr/cm3)	2,339	2,347
Densidad Aparente (gr/cm3)	2,194	2,206
Porcentaje de Absorción (%)	6,589 %	6,384 %

Fuente: Propia.

Por lo tanto los factores que permitieron una fijación óptima de dióxido de carbono en los Agregados Reciclados de concreto son los siguientes:

- Temperatura 23°.
- Contenido de humedad del ARC: Seco al horno.
- Tiempos de exposición. Dos semanas para tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ".
- Concentración de CO₂: 10%.
- Humedad relativa: 65%.

Una vez determinados los factores, se procedió a ejecutar la etapa 2 del programa experimental, tal y como se evidencia en la Figura 15, sometiendo el material a estos parámetros establecidos, Figura 16.

Figura 15. Ingreso de los Agregados Reciclados a la Cámara de Carbonatación.



Fuente: Propia.

Figura 16. Fijación de los Parámetros de la Cámara de Carbonatación.



Fuente: Propia.

8.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Una vez los ARC completaron el tiempo de exposición, con los parámetros determinados en la etapa 1 del programa experimental, en la cámara de carbonatación acelerada se convierten en el material de referencia para iniciar el desarrollo de la etapa 2, comparando los resultados de cada uno de los ensayos con los resultados de los agregados naturales y los ARC sin carbonatar, analizando el cumplimiento de norma INVIAS para cada uno de los materiales.

8.2.1. Propiedades Físicas.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades físicas del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.1.1. Densidades (nominal, aparente y SSS) y Absorción.

Los resultados de los ensayos INV E-223-13 de densidades nominales, SSS y aparentes y absorción en cada uno de los tres tipos de agregado grueso en estudio se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados Ensayo Densidad y Absorción (Agregados)

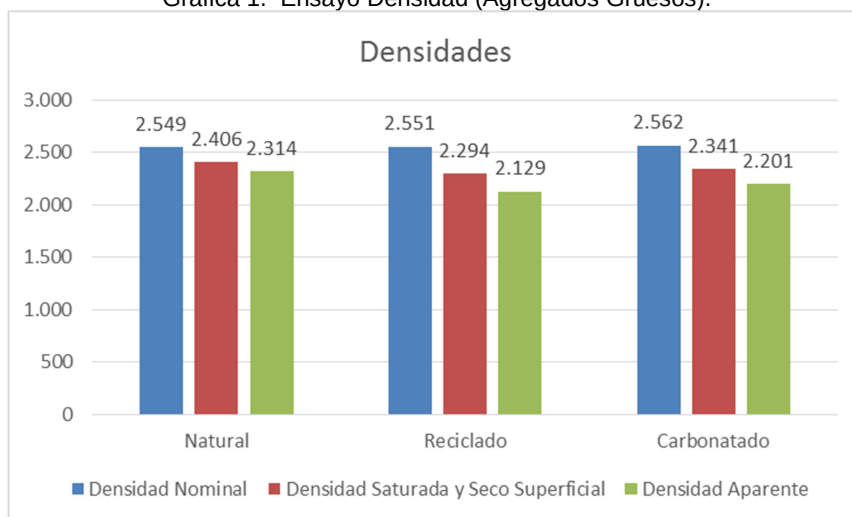
	Natural	Reciclado	Carbonatado
Peso Platón	187	304	258
Platón + Msss	3.407	4.917	3.091
Peso en H ₂ O	1.885	2.607	1.626
Platón + seca	3.284	4.585	2.921
Densidad Nominal	2.549	2.551	2.562
Densidad Saturada y Seco Superficial	2.406	2.294	2.341
Densidad Aparente	2.314	2.129	2.201
% Absorción	3,97%	7,76%	6,38%

Fuente: Propia.

El estudio de (Bojacá Castañeda, 2013) identifica que el agregado reciclado proveniente de la trituración de concreto comparado con el agregado natural, presenta mayor absorción, menor densidad (aparente y nominal). Confirmando lo anterior, luego de analizar los resultados de las densidades y absorciones de los tres tipos de agregados podemos concluir e identificar que los ARC y los ARC carbonatados óptimos tienen menor densidad y mayor absorción que los agregados naturales, Gráfica 1 y Gráfica 2, resultados que se atribuyen al mortero adherido.

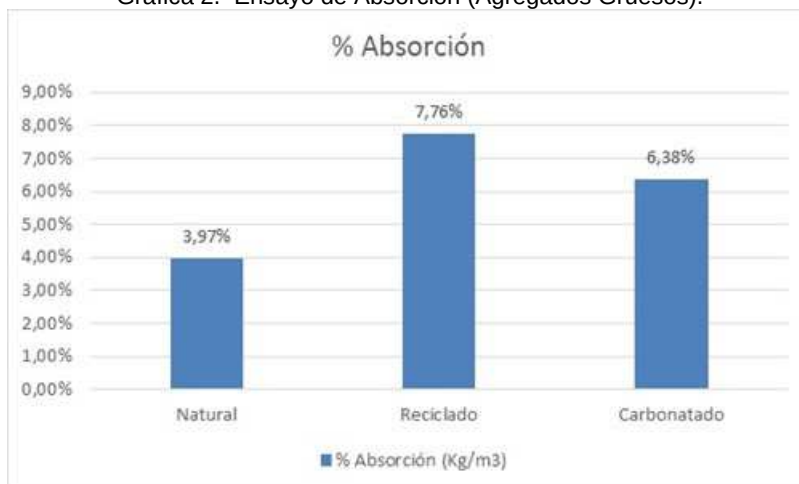
Al comparar los resultados de densidades y Absorción entre los ARC y ARC carbonatado óptimo, se identifica que las densidades son mayores y la absorción es menor en el ARC Carbonatado óptimo, resultado que es atribuible al CO₂ fijado durante el proceso de carbonatación acelerada, como se indica en el estudio de (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013).

Gráfica 1. Ensayo Densidad (Agregados Gruesos).



Fuente: Propia.

Gráfica 2. Ensayo de Absorción (Agregados Gruesos).



Fuente: Propia.

Las densidades del ARC carbonatado óptimo son ligeramente mayores al ARC y al agregado natural, sin embargo su uso en el concreto no cambia, ya que para concretos de peso normal varía entre 2.000 kg/cm^3 a 2.600 kg/cm^3 .

Respecto a la absorción se evidencia que con el ARC carbonatado óptimo disminuyó un 1,371% con respecto al ARC, lo cual incide directamente en la dosificación del agua de mezclado y debe ser tenido en cuenta para hacer la correspondiente corrección. Lo anterior confirma el estudio de (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014) que indica que el volumen total de poros disminuyó en los residuos de pasta de cemento carbonatados.

8.2.2. Granulometría.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento en gradación del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su comparación de comportamiento frente al agregado natural y ARC.

8.2.2.1. Gradación.

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la granulometría para los tres tipos de agregados.

Tabla 7. Granulometría (Agregados Gruesos)

Tamiz	Natural (Ret.)	Reciclado (Ret.)	Carbonatado (Ret.)	Natural (% Ret)	Reciclado (% Ret)	Carbonatado (% Ret)	Natural (% Pasa)	Reciclado (% Pasa)	Carbonatado (% Pasa)
3"									
2 1/2"									
2"									
1 1/2"									
1"				0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	856,40	1.387,70	1.508,00	8,31%	12,86%	14,70%	91,69%	87,14%	85,30%
1/2"	7.368,00	3.855,00	3.967,00	71,51%	35,73%	38,66%	20,18%	51,41%	46,64%
3/8"	1.869,30	2.257,60	2.208,00	18,14%	20,92%	21,52%	2,04%	30,49%	25,13%
1/4"	132,70	2.173,20	1.689,00	1,29%	20,14%	16,46%	0,75%	10,35%	8,67%
No. 4	25,70	988,00	772,00	0,25%	9,16%	7,52%	0,50%	1,19%	1,14%
No. 8	12,90	78,30	83,00	0,13%	0,73%	0,81%	0,38%	0,46%	0,33%
No. 10	0,50	3,40	3,00	0,00%	0,03%	0,03%	0,37%	0,43%	0,31%
No. 16	1,60	13,70	7,00	0,02%	0,13%	0,07%	0,36%	0,31%	0,24%
No. 30	15,00	10,60	6,00	0,15%	0,10%	0,06%	0,21%	0,21%	0,18%
No. 40	1,40	4,20	3,00	0,01%	0,04%	0,03%	0,20%	0,17%	0,15%
No. 50	0,60	1,30	2,00	0,01%	0,01%	0,02%	0,19%	0,16%	0,13%
No. 60	3,70	4,80	2,00	0,04%	0,04%	0,02%	0,15%	0,11%	0,11%
No. 80	3,20	2,00	0,30	0,03%	0,02%	0,00%	0,12%	0,09%	0,11%
No. 100	3,80	2,90	3,00	0,04%	0,03%	0,03%	0,09%	0,07%	0,08%
No. 200	7,30	5,30	4,00	0,07%	0,05%	0,04%	0,02%	0,02%	0,04%
Fondo	1,60	1,90	4,00	0,02%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
TOTAL	10.303,70	10.789,90	10.261,30	100,00%	100,00%	100,00%			

Fuente: propia.

Al revisar la granulometría de los tres tipos de agregados gruesos se encontró que están por fuera de los rangos granulométricos establecidos en la Tabla 3, razón por la cual se requirió realizar una optimización granulométrica (Road note Laboratory) mezclando la arena y la grava en una proporción tal que se lograra la relación de agregado grueso y fino indicado en la norma INVIAS para la elaboración de las mezclas de concreto.

8.2.3. Propiedades de Dureza.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de dureza del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su comparación de comportamiento frente al agregado natural y ARC.

8.2.3.1. Desgaste Maquina de los Ángeles.

En la Tabla 8 se muestran los resultados del ensayo de desgaste con la Máquina de los Ángeles.

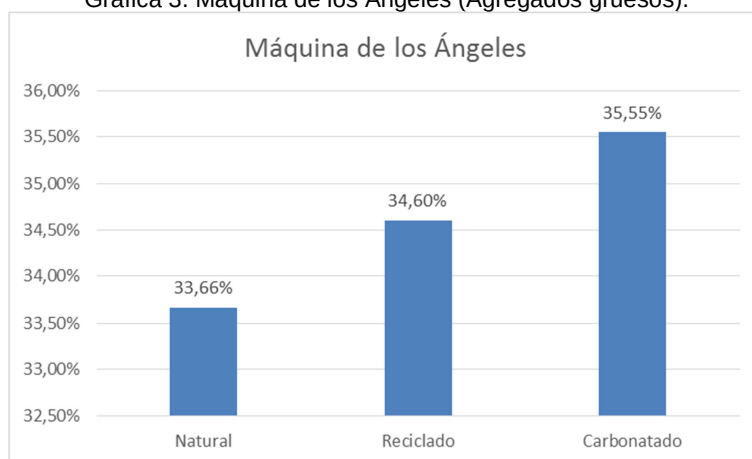
Tabla 8. Máquina de los Ángeles (Agregados gruesos).

	Natural	Reciclado	Carbonatado
Gradación Utilizada	B	B	B
Número de esferas	11	11	11
Peso Inicial	5.000,0	5.000,0	5.000,1
Peso a 500 revoluciones	3.317,0	3.270,0	3.222,7
% Desgaste 500 Rev.	33,66%	34,60%	35,55%

Fuente: Propia.

De acuerdo a la Tabla 2 el requisito máximo de desgaste para agregado grueso en mezclas de concreto hidráulico para 500 revoluciones es 40%, lo que significa que los tres tipos de agregado cumplen esta norma como se aprecia en la Gráfica 3. Sin embargo es importante indicar que el agregado carbonatado óptimo presenta un 1,89% más desgaste que el agregado natural, hecho que se atribuye a la pasta de cemento adherida al agregado.

Gráfica 3. Máquina de los Ángeles (Agregados gruesos).



Fuente: Propia.

8.2.3.2. Desgaste utilizando el aparato Micro-Deval.

En la Tabla 9 se muestran los resultados del ensayo de desgaste utilizando el aparato Micro-Deval.

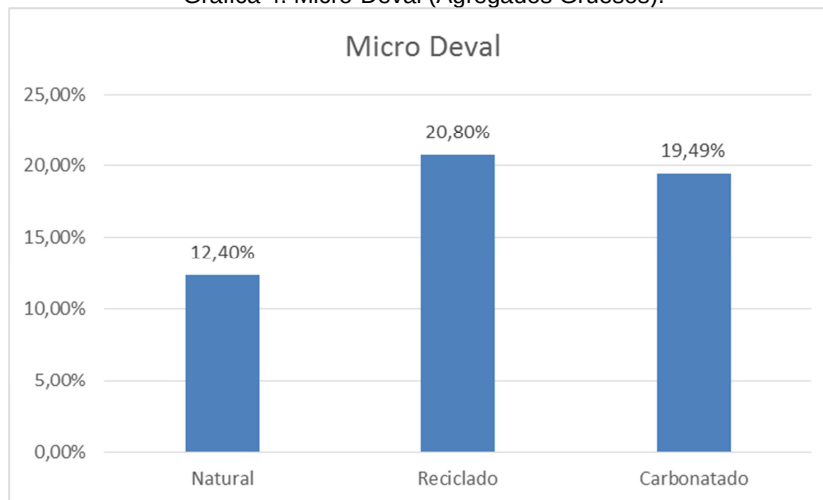
Tabla 9. Micro-Deval (Agregados gruesos).

	Natural	Reciclado	Carbonatado
Gradación Utilizada	X	X	X
Peso de esferas (gr)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Peso de agua	2,0 L	2,0 L	2,0 L
Peso Inicial (gr)	1.500,0	1.500,0	1.501,4
Peso a 500 revoluciones (gr)	1.314,0	1.188,0	1.208,8
% Desgaste 500 Rev.	12,40%	20,80%	19,49%

Fuente: Propia.

Al revisar los resultados del ensayo Micro-Deval para los tres tipos de agregados, podemos concluir que el ARC carbonatado óptimo es 7,09% menos resistente con respecto al agregado natural, hecho que se atribuye a la pasta de cemento adherida al agregado.

Gráfica 4. Micro-Deval (Agregados Gruesos).



Fuente: Propia.

Al comparar los ARC con los Agregados Naturales, se deduce una menor resistencia al desgaste con la Máquina de los Ángeles, como lo indica (Bojacá Castañeda, 2013), situación equivalente al contrastar los ARC carbonatados óptimos con los Agregados Naturales.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito máximo para agregado grueso es de 30%, lo que significa que los tres tipos de agregado cumplen esta norma como se aprecia en la Gráfica 4.

8.2.3.3. 10% de Finos.

En la Tabla 10 se muestran los resultados de la determinación del valor del 10% de finos.

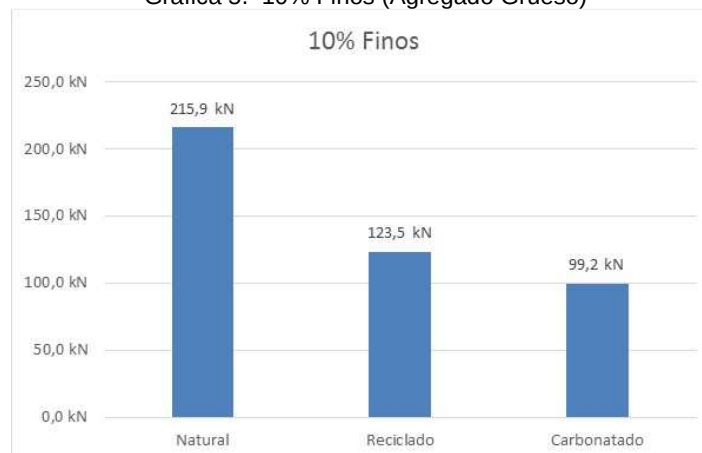
Tabla 10. 10% Finos (Agregado Grueso)

	Natural		Reciclado	Carbonatado	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 1	Muestra 2
Masa del agregado M1 (gr)	2.574	2.537	2.245,3	2.275	2.288
Penetración (mm)	18,0	19,0	19,0	20,0	17,0
Carga (Kg)	30.200	22.032	12.600	12.300	10.123
Carga (kN)	296 kN	215,9 kN	123,5 kN	120,5 kN	99,2 kN
Masa del agregado retenido No.8 M2	2.183	2.266	2.041	1.979	2.063
Rango de tolerancia 7,5 al 12,5%	NO	SI	SI	NO	SI
% Finos	15,19%	10,68%	9,10%	13,01%	9,83%
Carga necesaria (Kg)	22.032 kg	22.032 kg	12.600 kg	10.123 kg	10.123 kg

Fuente: Propia.

Al revisar los resultados para los tres tipos de agregados se aprecia que el ARC carbonatado óptimo presenta una disminución en su resistencia de 116,7 kN para producir un 10% de finos con respecto al agregado natural, hecho que se atribuye a la pasta de cemento adherida al agregado y su facilidad para ser desprendida.

Gráfica 5. 10% Finos (Agregado Grueso)



Fuente: Propia.

Al comparar los ARC con los Agregados Naturales, se deduce una menor resistencia al desgaste del ensayo de 10% de finos, como lo indica (Bojacá Castañeda, 2013), situación equivalente al contrastar los ARC carbonatados óptimos con los Agregados Naturales.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito mínimo para agregado grueso es de 90 KN, lo que significa que los tres tipos de agregado cumplen esta norma como se aprecia en la Gráfica 5.

8.2.4. Propiedades de Durabilidad.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de durabilidad del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.4.1. Pérdidas en ensayo de Solidez en sulfatos.

En la Tabla 11 se muestran los resultados de las pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos para cada uno de los agregados analizados.

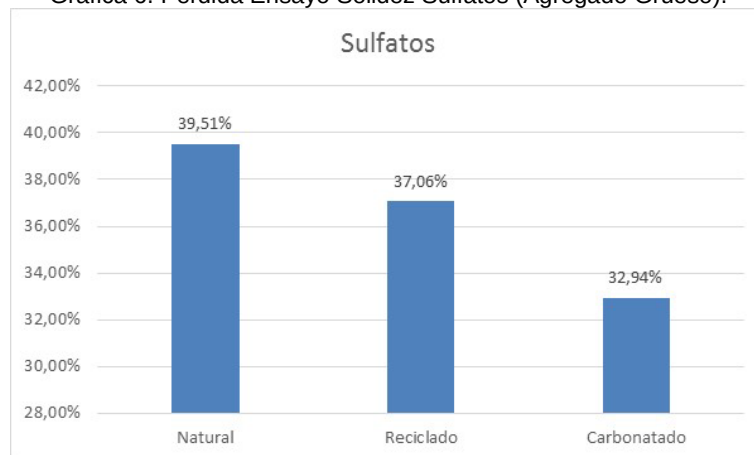
Tabla 11. Perdida Ensayo Solidez Sulfatos (Agregado Grueso).

Datos	Natural	Reciclado	Carbonatado
Peso Fracción antes del Ensayo	529,6	516,1	558,3
Peso retenido en tamiz designado	425,6	468,9	525,0
% perdida Fracción 1 - Tamiz (1" – ¾")	19,64%	9,15%	5,96%
Peso Fracción antes del Ensayo	1.009,3	1.015,1	1.213,5
Peso retenido en tamiz designado	939,0	860,4	1.033,0
% perdida Fracción 2 Tamiz (¾" – ½")	6,97%	15,24%	14,87%
Peso Fracción antes del Ensayo	313,7	306,1	353,8
Peso retenido en tamiz designado	273,2	267,3	311,0
% perdida Fracción 3 Tamiz (½" – 3/8")	12,91%	12,68%	12,10%
% Total de perdida	39,51%	37,06%	32,94%

Fuente: Propia.

Al revisar los resultados para los tres tipos de agregados se aprecia que el ARC carbonatado óptimo presenta una disminución porcentual en la pérdida de material del 6,57% respecto al Agregado Natural y del 4,12% respecto al agregado reciclado, es decir el proceso de carbonatación acelerada mejora la respuesta del material al ataque por sulfatos, ver grafica N° 6. Lo anterior coincide con lo expuesto en el estudio de (Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun, 2013), quienes indican que los especímenes de agregados reciclados carbonatados, exhibieron un mejor desempeño en cuanto a las propiedades de durabilidad, en comparación con los no carbonatados.

Gráfica 6. Perdida Ensayo Solidez Sulfatos (Agregado Grueso).



Fuente: Propia.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 “Requisitos del agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico” especificaciones INVIAS se encuentra que el requisito máximo (%) de pérdidas en el ensayo de solidez en Sulfatos en solución saturada de Sulfato de Sodio tipo farmacéutico es del 10%, lo que significa que los tres tipos de agregado cumplen esta norma, esto teniendo en cuenta que la precisión del ensayo es baja y el rango puede variar hasta en un 24 %, razón por la cual todos los agregados se encuentra cumpliendo lo especificado en norma, resultado analizado por cada uno de los tamices.

Los ARC y ARC carbonatados óptimos en conjunto presentan mayor duración frente al ataque por sulfatos, con una reducción en el desgaste a menor tamaño del agregado $\frac{3}{4}$ ”, prometiendo un uso masivo en obras viales en ambientes salinos agresivos, para lo cual se debe desarrollar otro tipo de ensayos que permitan determinar con más exactitud el comportamiento de este material en estos ambientes agresivos.

8.2.5. Limpieza.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades de limpieza del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación de propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.5.1. Terrones de Arcilla y partículas deleznales.

En la Tabla 12 se muestran los resultados de la Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados.

Tabla 12. Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables (Agregado Grueso).

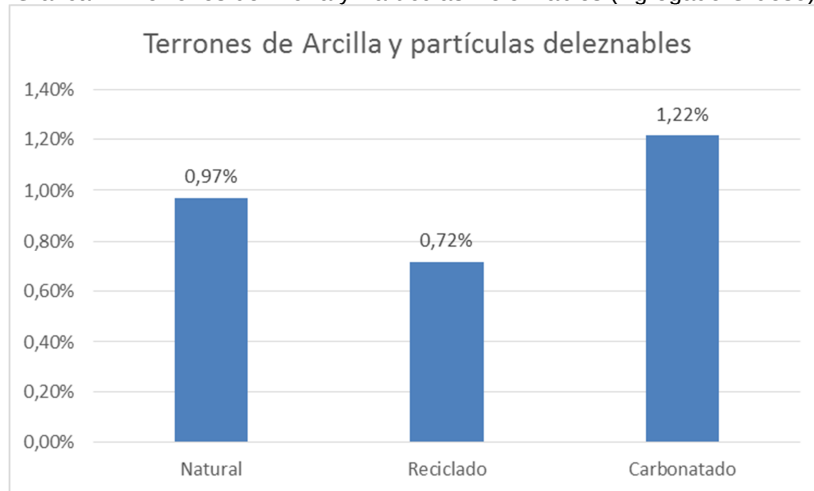
	Fracción	Natural	Reciclado	Carbonatado
Peso Inicial (gr)	1 1/2" - 3/4"	3.000	3.000	3.000
Peso retenido (gr)		2.999,6	2.992	2.995
% Terrones y Part. Deleznables		0,01%	0,27%	0,17%
Peso Inicial (gr)	3/4" - 3/8"	2.000	2.000	2.000
Peso retenido (gr)		1.998,7	1.995	1.991
% Terrones y Part. Deleznables		0,06%	0,25%	0,45%
Peso Inicial (gr)	3/8" - No 4	1.000	1.000	1.000
Peso retenido (gr)		991,1	998	994
% Terrones y Part. Deleznables		0,89%	0,20%	0,60%
% Total		0,97%	0,72%	1,22%

Fuente. Propia.

Al revisar los resultados para los tres tipos de agregados se aprecia que el ARC carbonatado óptimo presenta un leve aumento en el porcentaje con respecto a los otros dos tipos de agregado, atribuible a las impurezas de los materiales.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito máximo para agregado grueso es de 3%, lo que significa que los tres tipos de agregado cumplen esta norma como se aprecia en la Gráfica 7.

Gráfica 7. Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables (Agregado Grueso).



Fuente. Propia.

8.2.6. Geometría de Partículas.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de geometría

de partículas del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación en propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.6.1. Partículas Fracturadas Mecánicamente.

En la Tabla 13 se muestran los resultados del ensayo de Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

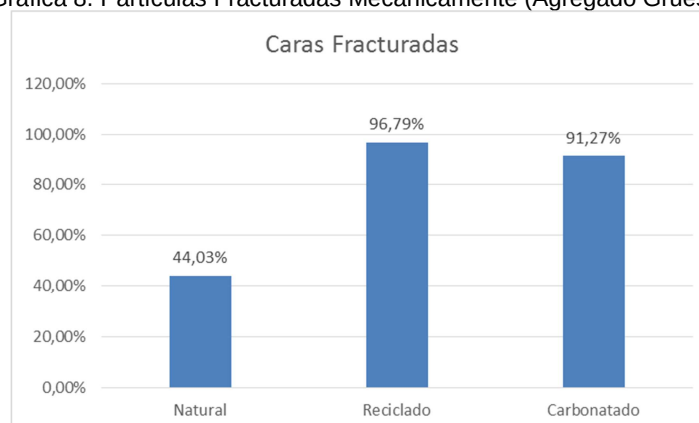
Tabla 13. Partículas Fracturadas Mecánicamente (Agregado Grueso).

Natural - Caras Fracturadas					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (gr)material Cara Fracturada	% Cara Fracturada	Peso (gr) SIN Cara Fracturada	% SIN Cara Fracturada
3/4"	856	583	68,11%	273	31,89%
1/2"	7.368	2.545	34,54%	4.823	65,46%
3/8"	1.869	1.253	67,04%	616	32,96%
N°4	200	151	75,50%	49	24,50%
TOTAL	10.293	4.532	44,03%	5.761	55,97%
ARC - Caras Fracturadas					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (gr)material Cara Fracturada	% Cara Fracturada	Peso (gr) SIN Cara Fracturada	% SIN Cara Fracturada
3/4"	895	880	98,32%	15	1,68%
1/2"	3.243	3.079	94,94%	164	5,06%
3/8"	1.957	1.937	98,98%	20	1,02%
N°4	200	197	98,50%	3	1,50%
TOTAL	6.295	6.093	96,79%	202,0	3,21%
ARC Carbonatado Optimo - Caras Fracturadas					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (gr)material Cara Fracturada	% Cara Fracturada	Peso (gr) SIN Cara Fracturada	% SIN Cara Fracturada
3/4"	1.508	1.448	96,02%	60	3,98%
1/2"	3.967	3.735	94,15%	232	5,85%
3/8"	2.208	1.818	82,34%	390	17,66%
N°4	200	194	97,00%	6	3,00%
TOTAL	7.883	7.195	91,27%	688	8,73%

Fuente: propia.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito mínimo para agregado grueso es de 60%. Como se observa en la Gráfica 8, los agregados naturales no cumplen con este requisito, a diferencia de los ARC y los ARC carbonatados. El proceso de carbonatación acelerada disminuye levemente (5,52%) el porcentaje de partículas con caras fracturadas en los agregados gruesos, hecho que se atribuye a un desprendimiento de la pasta de cemento del agregado.

Gráfica 8. Partículas Fracturadas Mecánicamente (Agregado Grueso).



Fuente: propia.

8.2.6.2. Índice de aplanamiento y alargamiento.

En la Tabla 14 se muestran los resultados del ensayo de Índice de aplanamiento y alargamiento.

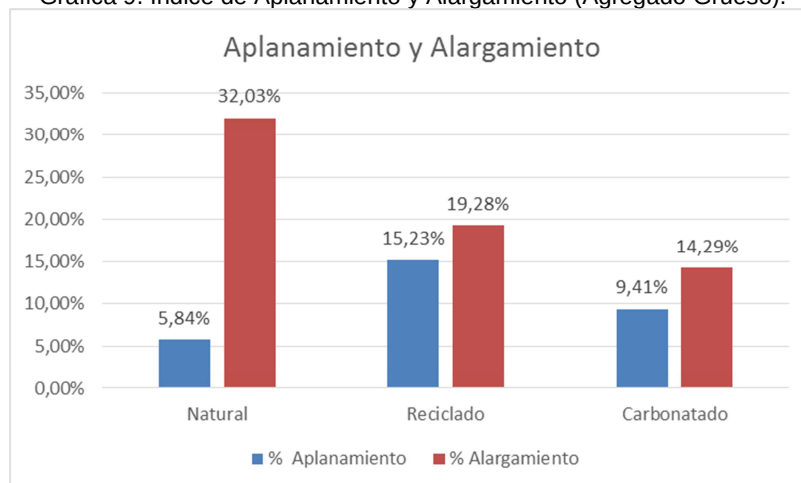
Tabla 14. Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregado Grueso).

Natural - APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (GR) pasa aplanamiento plantilla	% Aplanamiento	Peso (gr) Retenido alargamiento Barras	% Alargamiento
3/4"	856	158	18,46%	72	8,41%
1/2"	7.368	304	4,13%	2.171	29,47%
3/8"	1.869	139	7,44%	1.054	56,39%
1/4"	200	-	0,00%	-	0,00%
TOTAL	10.293	601	5,84%	3.297	32,03%
ARC - APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (GR) pasa aplanamiento plantilla	% Aplanamiento	Peso (gr) Retenido alargamiento Barras	% Alargamiento
3/4"	895	206	23,02%	132	14,75%
1/2"	3.243	614	18,93%	651	20,07%
3/8"	1.957	203	10,37%	315	16,10%
1/4"	2.016	212	10,52%	466	23,12%
TOTAL	8.111	1.235	15,23%	1.564	19,28%
ARC Carbonatado Optimo - APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO					
Retiene Tamiz	Peso Inicial	Peso (GR) pasa aplanamiento plantilla	% Aplanamiento	Peso (gr) Retenido alargamiento Barras	% Alargamiento
3/4"	1.176	116	9,86%	50	4,25%
1/2"	3.990	432	10,83%	506	12,68%
3/8"	2.223	147	6,61%	361	16,24%
1/4"	1.699	160	9,42%	382	22,48%
TOTAL	9.088	855	9,41%	1.299	14,29%

Fuente: Propia.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito máximo para agregado grueso es de 10%. Como se observa en la Gráfica 9, en cuanto al porcentaje de aplanamiento se evidencia que el proceso de carbonatación mejora levemente (5,82%) el porcentaje con respecto a los ARC. En cuanto al porcentaje de alargamiento la condición también disminuye levemente (4,99%) con el proceso de carbonatación acelerada. Lo anterior se estima por el sesgo en la ejecución del ensayo y por la manipulación adicional que tienen las ARC carbonatados óptimos.

Gráfica 9. Índice de Aplanamiento y Alargamiento (Agregado Grueso).



Fuente: Propia.

8.2.7. Características Químicas

A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos dentro de norma INVIAS Sección 200 agregados pétreos, para verificación de cumplimiento de las propiedades químicas del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación en propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.7.1. Contenido de sulfatos expresado como SO₄

En la Tabla 15 se muestran los resultados del ensayo de Determinación del contenido de sulfatos expresados como azufre.

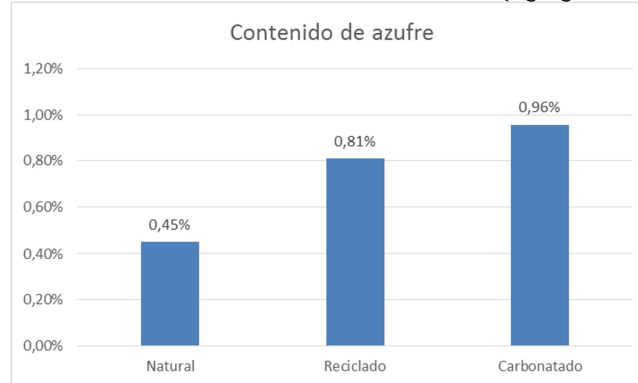
Tabla 15. Determinación del Contenido de Azufre (Agregado Grueso).

	Natural	Reciclado	Carbonatado
m1: Masa muestra de ensayo, gr	1,0	1,0	1,0
m2: Masa del precipitado, g.	0,0045	0,0081	0,0096
Contenido de azufre del agregado, en % masa	0,45%	0,81%	0,96%

Fuente: Propia.

Al comparar los resultados con la Tabla 2 se encuentra que el requisito máximo para agregado grueso es de 1%. Como se observa en la Gráfica 10, todos los tipos de agregados cumplen con este requisito.

Gráfica 10. Determinación del Contenido de Azufre (Agregado Grueso).



Fuente: Propia.

Los ARC presentan un mayor porcentaje de contenido de azufre con respecto a los agregados naturales, llevándolos al límite de la norma. Siendo los ARC más propensos a generar expansiones en una estructura de concreto que el agregado natural, lo que se atribuye al yeso presente en la pasta de cemento adherida a los agregados reciclados de concreto.

8.2.8. Otras Propiedades.

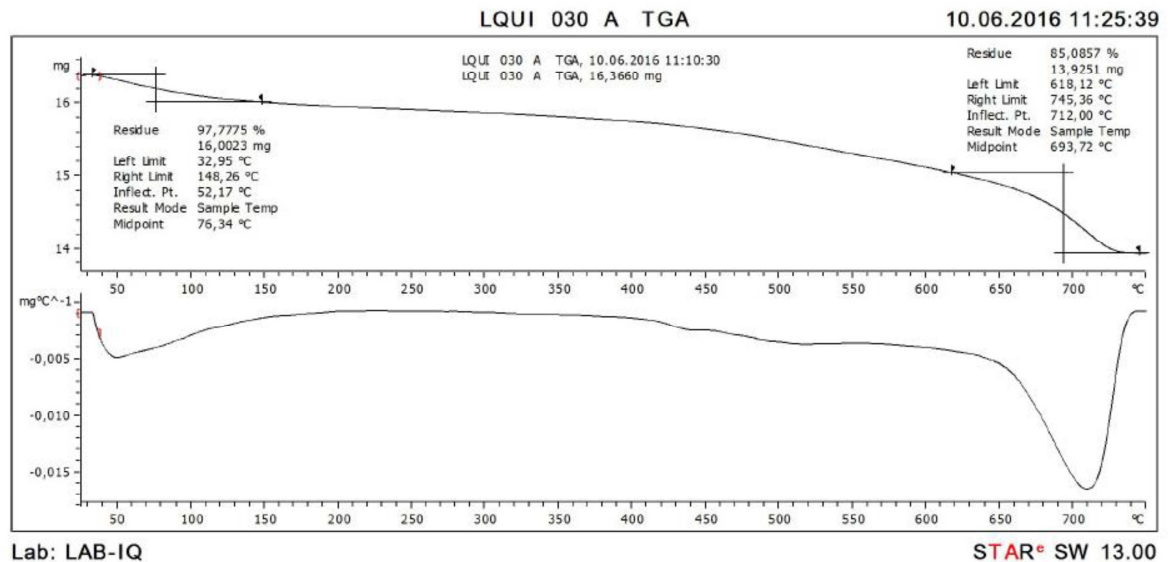
A continuación se presentan los resultados de los ensayos previstos fuera de norma INVIAS para agregados pétreos, con el objeto de verificación de comportamiento de las propiedades termo gravimétricas y térmico diferenciales del agregado referencia (ARC Carbonatado).

Adicional a lo anterior se presenta los resultados de los ensayos fuera de norma INVIAS para agregados pétreos, con el objeto de verificar el comportamiento del PH del agregado referencia (ARC Carbonatado) y su respectiva comparación en propiedades frente al agregado natural y ARC.

8.2.8.1. Análisis Termogravimétrico (ATG).

En la Gráfica 11 se muestran los resultados del Análisis Termogravimétrico de la muestra de agregado reciclado carbonatado óptimo. Las condiciones de ensayo son: tamaño de la muestra 12,1 mg, el rango de temperatura varió desde la temperatura ambiente hasta 450°C, con tasa de aplicación de temperatura de 10°C por minuto, se utilizó nitrógeno para la atmosfera de ensayo con una aplicación de 50ml por minuto.

Gráfica 11. Análisis Termogravimétrico para ARC Carbonatado Óptimo.



Fuente: Propia.

De acuerdo con la Gráfica 11 se puede observar que la muestra de Agregado Reciclado de Concreto Carbonatado Óptimo, entre 30 y 140 °C presenta un cambio en la pendiente que se puede atribuir a una pérdida de humedad propia del material, a los 700°C presenta descomposición del carbonato de calcio, formándose óxido de calcio y dióxido de carbono.

De acuerdo con la norma ASTM E1131 – 08 Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry el contenido de materia altamente volátil puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{W - R}{W} \times 100\%$$

Dónde:

V = contenido de materia altamente volátil, como base recibida (%), = 2,22 %

W = masa del espécimen original, (mg), = 16,366 mg.

R = masa medido a temperatura X (mg) = 16,0023 mg.

El contenido de materia volátil medio puede determinarse utilizando la siguiente ecuación:

$$O = \frac{R - S}{W} \times 100\%$$

Dónde:

O = contenido de materia volátil medio, según sea recibida,%, = 12,5339%

R = masa medido a temperatura X, (mg), = 16,0023 mg

S = masa medido a temperatura Y, (mg), = 13,951 mg.

W = masa original de la muestra, (mg) = 16,366 mg.

El contenido de material combustible puede calcularse la siguiente ecuación:

$$C = \frac{S - T}{W} \times 100 \%$$

Dónde:

C = contenido de material combustible, según sea recibida, (%), = 0,9226%

S = midieron la masa a temperatura Y, (mg), = 13,951 mg.

T = masa medido a temperatura Z, (mg) y = 13,80 mg.

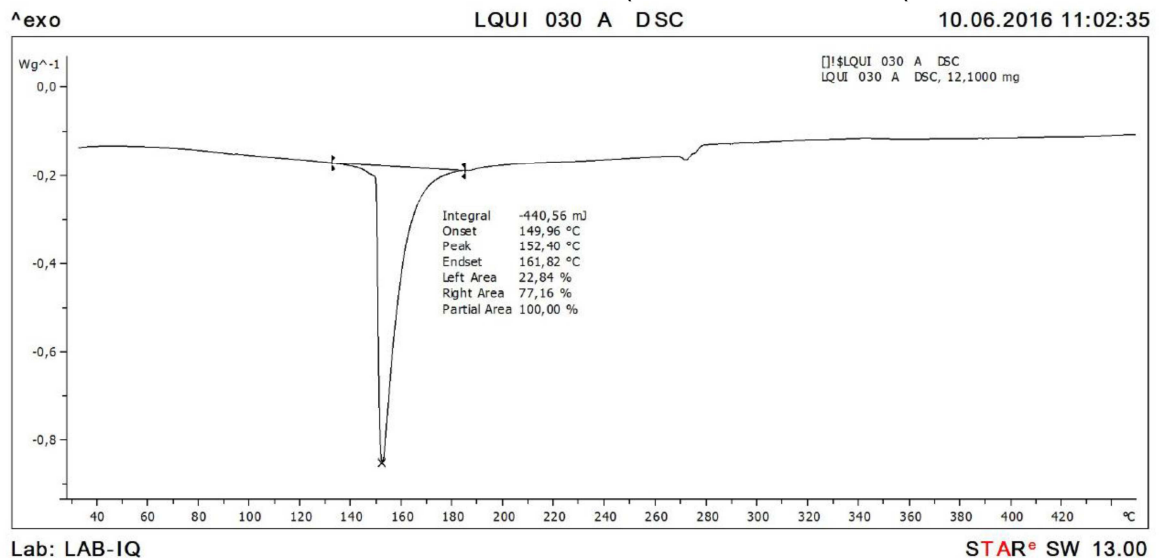
W = masa original de la muestra, (mg) = 16,366 mg.

Sumando el contenido de materia altamente volátil, el contenido de materia volátil medio y el contenido de material combustible se tiene un 15,68% de la masa, razón por la cual el contenido de cenizas es de 84,3%, lo que significa que la muestra de ARC carbonatado óptimo no es un material combustible, el cual puede resistir altas temperaturas por periodos prolongados de tiempo sin modificar sus propiedades físicas, es decir el proceso de carbonatación acelerada para los agregados reciclados de concreto gruesos no genera valor agregado en la resistencia al fuego en mezclas de concreto.

8.2.8.2. Térmico Diferencial (ATD).

En la Gráfica 11 se muestran los resultados del Análisis Termogravimétrico.

Gráfica 12. Análisis Térmico Diferencial para ARC Carbonatado Óptimo.



Fuente: Propia.

Es impórtate resaltar que se presenta un proceso exotérmico, es decir desprendimiento de calor, a una temperatura pico de 152,4°C, con una pérdida de Energía de 440,56 J.

8.2.8.3. Medición de PH.

El ensayo de PH en los agregados en estudio determina el grado de acidez o alcalinidad de muestras de material de cada uno de los agregados en estudio suspendidas en agua y en una solución de 0.01 M de cloruro de calcio. Esta variable es útil en la determinación de la reacción del agregado con el cemento en la mezcla de concreto y de la movilidad de los iones en la mezcla.

En la Tabla 16 se muestran los resultados del ensayo pH de suelos.

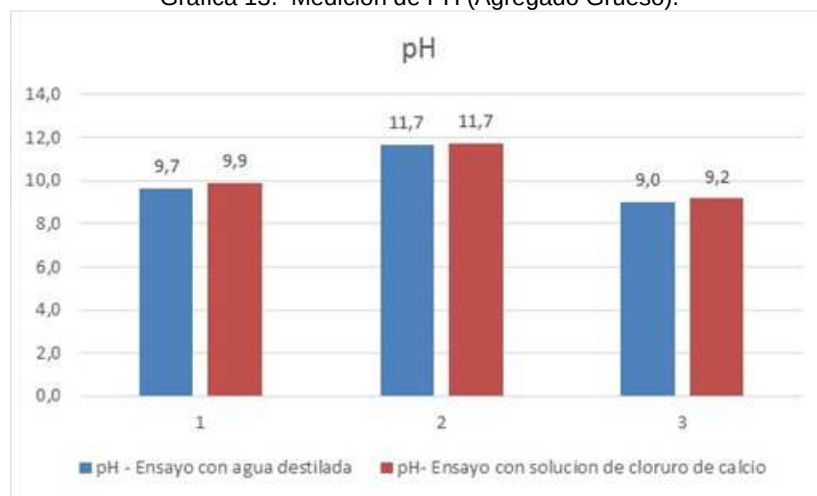
Tabla 16. Medición de PH (Agregado Grueso)

Método A (Potenciómetro)	Natural	Reciclado	Carbonatado
pH - Ensayo con agua destilada	9,7	11,7	9,0
pH- Ensayo con solución de cloruro de calcio	9,9	11,7	9,2

Fuente: Propia.

En la Gráfica 13 se puede observar que el ARC carbonatado óptimo disminuye con respecto al ARC e incluso es menor levemente que el agregado natural.

Gráfica 13. Medición de PH (Agregado Grueso).



Fuente: Propia.

Dentro de la escala de PH los ARC carbonatados óptimos se encuentra en la zona de las bases, indicando que es compatible para mezclas de concreto. Se nota una gran variación con respecto a los ARC con una disminución de 2,6 generado por el proceso de carbonatación acelerada.

Como se ha indicado con respecto a la caracterización de los ARC carbonatados óptimos, sus propiedades físicas, dureza, durabilidad, geometría, y químicas, difieren de las convencionales, lo que requiere un desarrollo normativo que favorezca su uso en la construcción de carreteras, cuya participación todavía es muy baja en algunos países subdesarrollados (Jiménez, 2013), de la misma forma como se ha propuesto para los ARC. Lo mismo indica (Laverde, 2014) al mencionar que con una clasificación adecuada de los ARC y la creación de normas técnicas tanto para estos agregados como para los concretos, se podría implementar en el país el uso del concreto con ARC, de la misma manera el uso de los ARC carbonatados lográndose beneficios ambientales.

También indica (Jiménez, 2013) en su estudio que en los ARC la resistencia a la fragmentación, compuestos de azufre y sales solubles han sido identificados como el limitante para su uso; ya que los ARC sobrepasan los límites establecidos por diferentes normas, en cuanto a contenido de impurezas, como los compuestos de azufre, sales y yeso, las cuales disminuyen la estabilidad y capacidad de soporte. Sin embargo en la presente investigación se encuentra que los ARC no cumplen por muy poco con las especificaciones generales de construcción de carreteras de INVIAS 2013 en los ensayos de Sulfatos (sólo una fracción), % Aplanamiento y % Alargamiento y los ARC carbonatados óptimos no cumplen para % Alargamiento.

En la Tabla 17 se muestra un resumen de los ensayos de la caracterización de los tres tipos de agregados con su correspondiente cumplimiento con respecto a las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS 2013.

Tabla 17. Resumen de Caracterización de Agregados.

Propiedad	Natural	Reciclado	Carbonatado	Ensayo	Máximo / Mínimo	Cumplimiento Norma INVIAS 2013		
						Natural	Reciclado	Carbonatado
Densidad Nominal (kg/m3)	2.549	2.551	2.562	INV E-223-13	Diseño	N.A.	N.A.	N.A.
Densidad Saturada y Seco Superficial (Kg/m3)	2.406	2.294	2.341					
Densidad Aparente (Kg/m3)	2.314	2.129	2.201					
% Absorción (Kg/m3)	3,972%	7,755%	6,384%					
Granulometría					Diseño	AJUSTADA	AJUSTADA	AJUSTADA
Máquina de los ángeles	33,66%	34,60%	35,55%	INV E-218-13	Máx 40,00%	SI	SI	SI
Micro deval	12,40%	20,80%	19,49%	INV E-238-13	Máx 30,00%	SI	SI	SI
10% finos	215,91 kN	123,48 kN	99,21 kN	INV E-224-13	Mín 90,00 kN	SI	SI	SI
Sulfatos (Total)	39,51%	37,06%	32,94%	INV E-220-13	Máx 15,00%			
% perdida Fracción 1	19,64%	9,15%	5,96%			NO	SI	SI
% perdida Fracción 2	6,97%	15,24%	14,87%			SI	NO	SI
% perdida Fracción 3	12,91%	12,68%	12,10%			SI	SI	SI
Terrones	0,97%	0,72%	1,22%	INV E-211-13	Máx 3,00%	SI	SI	SI
% Partículas Cara Fracturada	44,03%	96,79%	91,27%	INV E-227-13	Mín 60,00%	NO	SI	SI
% Aplanamiento	5,84%	15,23%	9,41%	INV E-230-13	Máx 10,00%	SI	NO	SI
% Alargamiento	32,03%	19,28%	14,29%		Máx 10,00%	NO	NO	NO
Contenido de azufre del agregado, en % masa	0,45%	0,81%	0,96%	INV E-233-13	Máx 1,00%	SI	SI	SI
pH - Ensayo con agua destilada	9,65	11,65	9,02	INV E-131-13	Diseño	N.A.	N.A.	N.A.
pH- Ensayo con solución de cloruro de calcio	9,89	11,73	9,16	INV E-131-13	Diseño	N.A.	N.A.	N.A.

Fuente: Propia.

8.3. ENSAYOS MEZCLAS DE CONCRETO

Se realizaron mezclas de concreto, Figura 17, para diferentes combinaciones de agregados utilizando remplazo de agregados naturales por ARC y ARC carbonatados óptimos, utilizando una relación agua cemento de 0,35, para realizar pruebas a los 7 días y 28 días.

Las combinaciones utilizadas en las mezclas de concreto fueron las siguientes:

- Tipo 1: 100% Agregado Natural
- Tipo 2: 100% ARC
- Tipo 3: 75% Agregado Natural 25% ARC (75% NAT 25% ARC)
- Tipo 4: 50% Agregado Natural 50% ARC (50% NAT 50% ARC)
- Tipo 5: 100% ARC Carbonatado Óptimo
- Tipo 6: 75% Agregado Natural 25% ARC Carbonatado Óptimo (75% NAT 25% CARB)
- Tipo 7: 50% Agregado Natural 50% ARC Carbonatado Óptimo (50% NAT 50% CARB)

Figura 17. Elaboración Mezclas de Concreto para Cilindros.



Fuente: Propia.

Los Parámetros de entrada para el diseño de mezcla se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros de Entrada para Diseño de Mezcla.

Parámetro	Valor
Relación A/C:	0,35
% Contenido de Aire:	2%
Asentamiento (cm):	7,5
Agua mezcla Lt/m ³ :	200
% Arena :	45%
% Grava :	55%
Desperdicio (%) :	10%

Parámetro	Valor
TM (pulg) :	3/4
TMN (pulg) :	3/4
Densidad arena (kg/m ³) :	2.620
Densidad grava Natural (kg/m ³) :	2.406
Densidad grava ARC (kg/m ³) :	2.294
Densidad grava CARB (kg/m ³) :	2.341
% Absorción arena :	4,1
% Absorción grava Natural :	3,97
% Absorción grava ARC :	7,76
% Absorción grava CARB :	6,38
% Humedad arena :	8,00
% Humedad grava Natural :	2,60
% Humedad grava ARC :	2,40
% Humedad grava CARB :	2,40
Densidad Cemento (kg/m ³) :	2.800
Plastificante (% en peso de cemento) :	1,0%

Fuente: Propia.

En la Tabla 19 se muestran los diseños de mezcla de concreto para las siete combinaciones. Para todas las mezclas se tuvo en cuenta el porcentaje de absorción y de humedad para el día de fundida, esto con el fin de realizar las correcciones respectivas en el contenido de agua de mezcla. El cemento utilizado para todas las combinaciones fue el mismo, cemento Tipo 1, ARGOS de bulto.

Tabla 19. Diseño de Mezclas de Concreto.

	Natural	ARC	75% NAT 25% ARC	50% NAT 50% ARC	ARC CARB	75% NAT 25% CARB	50% NAT 50% CARB
Material	Peso (kg/m ³)						
Agua (corregida)	186,1	214,5	193,4	200,5	205,2	191,0	195,8
Súper plastificante	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Aire	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cemento	571,4	571,4	571,4	571,4	571,4	571,4	571,4
Agregado Grueso	773,9	724,9	576,5	381,7	742,97	578,2	383,9
Reemplazo Agr. Grueso			192,2	381,7		192,7	383,9
Agregado Fino	665,5	647,5	661,1	656,6	655,2	663,0	660,4

Fuente: Propia.

Una vez realizadas las mezclas se dispusieron moldes cilíndricos para su posterior desencofrado y curado (Figura 18), para realizar ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad medido a 7 y 28 días.

Figura 18. Cilindros de Concreto Fresco en sus Moldes.



Fuente: Propia.

Como una aplicación para concretos utilizados en carreteras se elaboraron viguetas estándar de las mezclas Tipo 6 y Tipo 7 para ensayarlas a flexión y conocer su módulo de rotura a 28 días. Se utilizaron estos tipos de mezclas ya que son los que contienen sustitución por ARC carbonatados óptimos.

Figura 19. Elaboración de Mezclas de Concreto para Vigas.



Fuente: Propia.

Una vez realizadas las mezclas se disponen moldes prismáticos, viguetas estándar de 15x15x50 cm para su posterior desencofrado y curado (Figura 20).

Figura 20. Vigas de Concreto Fresco en sus Moldes.



Fuente: Propia.

8.3.1. Asentamiento.

En la Tabla 20 se muestran los asentamientos medidos y las diferencias con respecto al asentamiento de diseño, para cilindros y vigas (Figura 21).

Tabla 20. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
	Natural	Reciclado	75% NAT 25% ARC	50% NAT 50% ARC	Carbonatado	75% NAT 25% CARB	50% NAT 50% CARB
Asentamiento Diseño	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm
Asentamiento Medido	10,0 cm	9,5 cm	8,5 cm	9,0 cm	7,5 cm	9,5 cm	7,5 cm
Diferencia	2,5 cm	2,0 cm	1,0 cm	1,5 cm	0,0 cm	2,0 cm	0,0 cm

Fuente: Propia.

Figura 21. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).



Fuente: Propia.

Luego de revisar los asentamientos de las siete mezclas correspondientes al alcance del trabajo de grado, se identificó que estas se encuentran dentro del rango de tolerancia permitido por la especificación INVIAS 2013 en la tabla 500-9 Tolerancias en el asentamiento y en el contenido de aire definidos en la fórmula de trabajo (ver Tabla 21). Vale la pena aclarar que el asentamiento de diseño es de 7,5 cm.

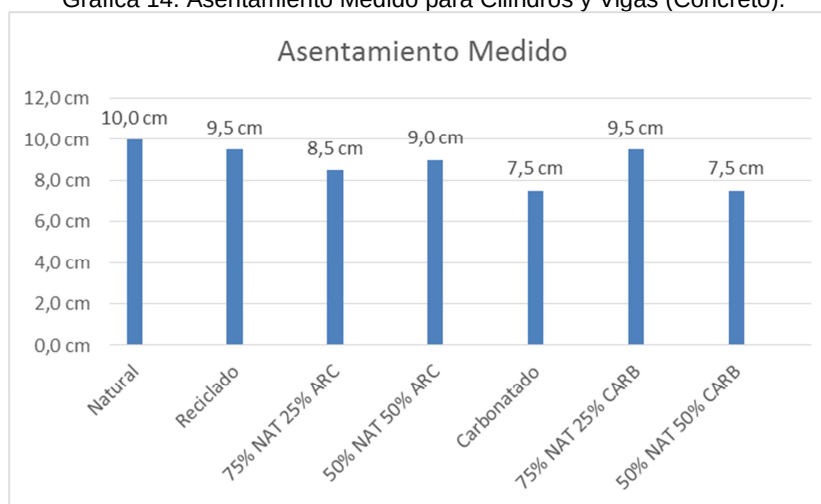
Tabla 21. Tolerancias en el Asentamiento y en el Contenido Definido en la Fórmula de Trabajo

CARACTERÍSTICA	CONSTRUCCIÓN	TOLERANCIA
Asentamiento	Formaletas fijas	25 a 50
	Formaletas deslizantes	13 a 38
Contenido de aire, cuando esté especificado	Formaletas fijas	+ 1.8 %
	Formaletas deslizantes	+ 1.8 %

Fuente: Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales de Construcción 2013.

El cumplimiento de este parámetro permitió una adecuada manejabilidad de la mezcla y evidenció en el estado fresco la correcta dosificación de la cantidad de agua en la mezcla. Los resultados se pueden ver en la Gráfica 14.

Gráfica 14. Asentamiento Medido para Cilindros y Vigas (Concreto).



Fuente: Propia.

8.3.2. Resistencia a la Compresión.

Una vez desencofrados los cilindros de concreto se llevan a la piscina de curado (Figura 22) donde permanecieron hasta el momento del ensayo de Resistencia a la Compresión a 7 y 28 días. En el Anexo E se pueden observar los cálculos realizados.

Figura 22. Desencofrado y Curado de Cilindros de Concreto.



Fuente: Propia.

En la Tabla 22 se muestra los resultados promedio de dos cilindros para el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en mezclas de Concreto.

Tabla 22. Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 Días (Concreto).

Resistencia a la Compresión (MPa)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
	Natural	Reciclado	75% NAT 25% REC	50% NAT 50% REC	Carbonatado	75% NAT 25% CARB	50% NAT 50% CARB
Resistencia a la Compresión 7 días (MPa)	23,3	27,0	24,8	22,3	26,3	19,7	14,9
Resistencia a la Compresión 28 días (MPa)	30,2	36,0	31,9	28,7	35,8	27,2	26,9

Fuente: Propia.

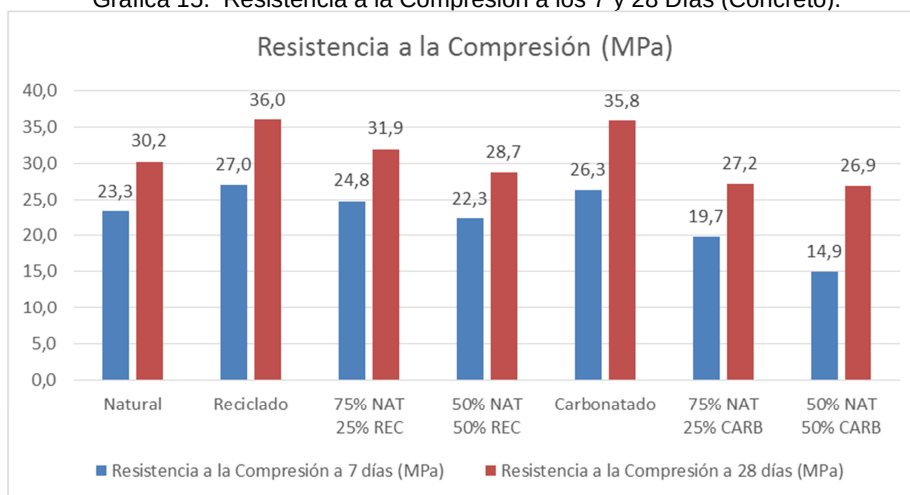
Al revisar los resultados de la resistencia a la compresión a 28 días, ver Gráfica 15, de las mezclas con 100% agregado natural (Tipo 1) comparándolas con mezclas 100% ARC (Tipo 2) y ARC carbonatado óptimo (Tipo 5), se identifica que su resistencia es menor respecto a este tipo de mezclas, resultado que no concuerda con lo encontrado por (Laverde, 2014). Lo anterior lo atribuimos a que el ARC y ARC carbonatado óptimo provienen de concretos de buena resistencia, sumado a que los agregados naturales tienen un porcentaje de agregados con caras fracturadas, correspondiente a 44,03%, Gráfica 8, el cual no cumple con lo requerido por INVIAS de acuerdo a la Tabla 2.

Al comparar las resistencias a compresión, Gráfica 15, de las mezclas con porcentaje de remplazo ARC (Tipo 2) y ARC carbonatado óptimo (Tipo 5) se evidencia una disminución con respecto a las mezclas con agregados naturales (Tipo1). Resultados que se encuentran de acuerdo a (Laverde, 2014) en cuya investigación encontró que en las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados la resistencia a la

compresión son más bajos que para concretos con agregado natural y también afirma que las causas que inciden en la reducción de la resistencia a la compresión de concretos con ARC son las propiedades de origen del ARC, así como su cantidad en la mezcla.

Luego de identificar las resistencias a compresión (28 días) de las mezclas de concreto 100% ARC (Tipo 2) respecto a mezclas de concreto 100% ARC carbonatado óptimo (Tipo 5), ver Gráfica 15, los resultados son similares (36 MPa), es decir el proceso de carbonatación acelerada para los agregados reciclados gruesos no genera un valor agregado significativo de resistencia a la compresión para este tipo de mezclas de concreto. Confirmando lo indicado por (Yanfeng Fang, Jun Chang Chang, 2014) en su estudio, la resistencia a la compresión para mezclas 100% ARC Carbonatadas optimas presentan tendencia de ganancia de resistencia y su valor se encuentra por encima de los 28,6 MPa.

Gráfica 15. Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 Días (Concreto).



Fuente: Propia.

De acuerdo a lo identificado en la primera etapa del programa experimental, uno de los parámetros para obtener la mayor fijación de CO_2 es la humedad del agregado, la cual para nuestro trabajo fue identificada el agregado seco al horno, resultado que concuerda con lo manifestado por el estudio de (Adem Ait, Karim, Abdelkader, & M'Hamed, 2016), el cual encontró que la resistencia a la compresión observada es similar a la del concreto convencional, esto debido a que los agregados secos son porosos, el agua se elimina de la mezcla y la relación a/c efectiva se hace más baja, lo que aumenta la rigidez de la mezcla y la resistencia mecánica.

8.3.3. Módulo de Elasticidad.

Se realiza el ensayo INV E-424-13 Módulo de elasticidad estático y Relación de Poisson del concreto a compresión. En la Tabla 23 se muestran los resultados del módulo de elasticidad a 7 y 28 días. En el Anexo E se pueden ver los caculos realizados.

Tabla 23. Módulo de Elasticidad a 7 y 28 Días.

Módulo de Elasticidad (MPa)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
	Natural	Reciclado	75% NAT 25% REC	50% NAT 50% REC	Carbonatado	75% NAT 25% CARB	50% NAT 50% CARB
Módulo de Elasticidad a 7 días (MPa)	32.405	29.091	28.057	27.837	28.770	24.157	22.464
Módulo de Elasticidad a 28 días (MPa)	36.165	35.515	32.351	29.090	37.741	35.741	32.873

Fuente: Propia.

Luego de revisar los resultados del módulo de elasticidad para las mezclas elaboradas con 100% ARC carbonatado óptimo (Tipo 5) se encontró un incremento relevante del orden 10.000 MPa de los 7 a los 28 días, resultado generado durante en el proceso de curado, ver Gráfica 16.

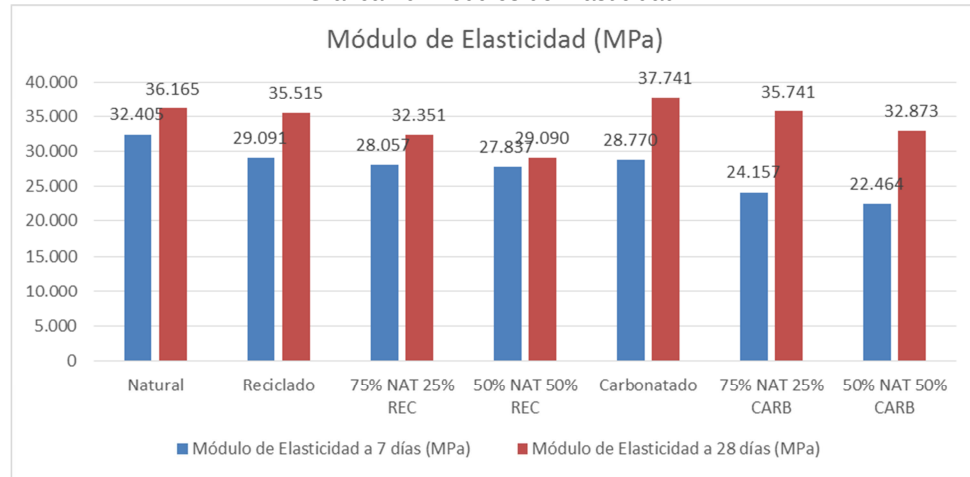
Al revisar los resultados de las mezclas con porcentaje de remplazo se evidencia una disminución en el módulo de elasticidad con respecto a las mezclas sin sustitución de agregados hecho atribuible a la combinación heterogénea de agregados gruesos en la mezcla, de textura lisa y forma redondeada, ver Gráfica 16.

En el estudio de (Bojacá Castañeda, 2013) se identificó que los resultados de módulo elástico no son concluyentes, pero se puede afirmar que no hay disminución de éste, comparando los ARC con los Agregados Naturales. En esta investigación al comparar los módulo de elasticidad de la mezclas 100% ARC (Tipo 2) con los ARC carbonatados óptimos (Tipo 5) se nota un incremento en estos últimos atribuible al proceso de carbonatación acelerada.

En el estudio de (Laverde, 2014), se encontró que en las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados del módulo de elasticidad son más bajos que los concretos con agregado natural. De la misma forma al comparar las mezclas con mayor porcentaje de remplazo de ARC y ARC carbonatado óptimo disminuyen, pero son mayores comparándolas con las mezclas que tienen ARC, ver Gráfica 16.

Los mayores módulos de elasticidad se debieron fundamentalmente al tipo de agregado en cada mezcla. Los tres tipos de agregados utilizados para las mezclas cumplen con la norma INVIAS para el ensayo de 10% de finos, mayor a 90kN, el porcentaje de caras fracturadas mucho mayor al 60% mínimo requerido por la norma. También influye el tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ " que al no ser una partícula muy grande permite una mayor cohesión con el cemento.

Gráfica 16. Módulos de Elasticidad.



Fuente: Propia.

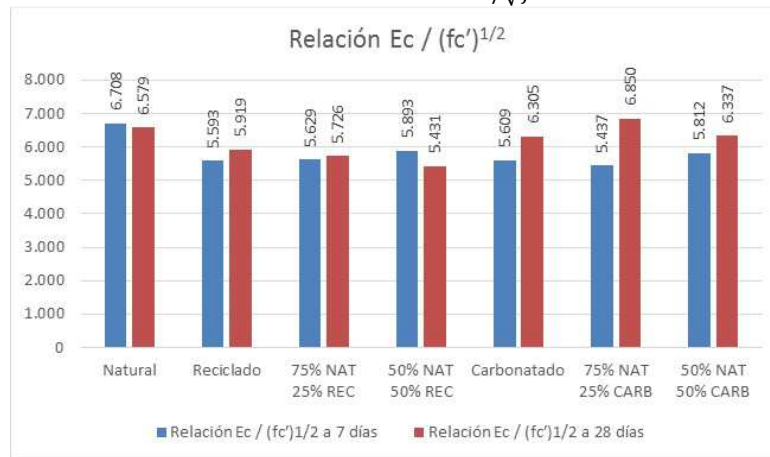
El reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente en la sección C.8.5.1 indica que el módulo de elasticidad puede tomarse como $4700\sqrt{f'c}$, para concretos de densidad normal. En la Tabla 24 se muestran los resultados de la relación $E_c/\sqrt{f'c}$ calculados. Se identifica que los resultados de esta relación son mayores a 4.700 para todos los tipos de mezclas como se puede observar en la Gráfica 17, lo que nos indica que la constante de 4.700 no aplica para los tres tipos de agregados de este trabajo de grado.

Tabla 24. Relación $E_c/\sqrt{f'c}$.

Módulo de Elasticidad (MPa)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
	Natural	Reciclado	75% NAT 25% REC	50% NAT 50% REC	Carbonatado	75% NAT 25% CARB	50% NAT 50% CARB
Ec a 7 días (MPa)	32.405	29.091	28.057	27.837	28.770	24.157	22.464
Ec a 28 días (MPa)	36.165	35.515	32.351	29.090	37.741	35.741	32.873
f'c 7 días (MPa)	23,3	27,0	24,8	22,3	26,3	19,7	14,9
f'c 28 días (MPa)	30,2	36,0	31,9	28,7	35,8	27,2	26,9
Rel. Ec / (fc') ^{1/2} a 7d	6.708	5.593	5.629	5.893	5.609	5.437	5.812
Rel. Ec / (fc') ^{1/2} a 28 d	6.579	5.919	5.726	5.431	6.305	6.850	6.337

Fuente: Propia.

Gráfica 17. Relación $E_c/\sqrt{f'c}$



Fuente: Propia.

8.3.4. Módulo de Rotura.

Una vez desencofradas las vigas de concreto se llevaron a la piscina de curado (Figura 23). Se realiza el ensayo INV E-414-2013: Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.

Figura 23. Curado de Vigas de Concreto.



Fuente: Propia.

En la Tabla 25 se muestran los resultados del ensayo de Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.

Tabla 25. Datos Ensayo de Flexión y Cálculo del MR.

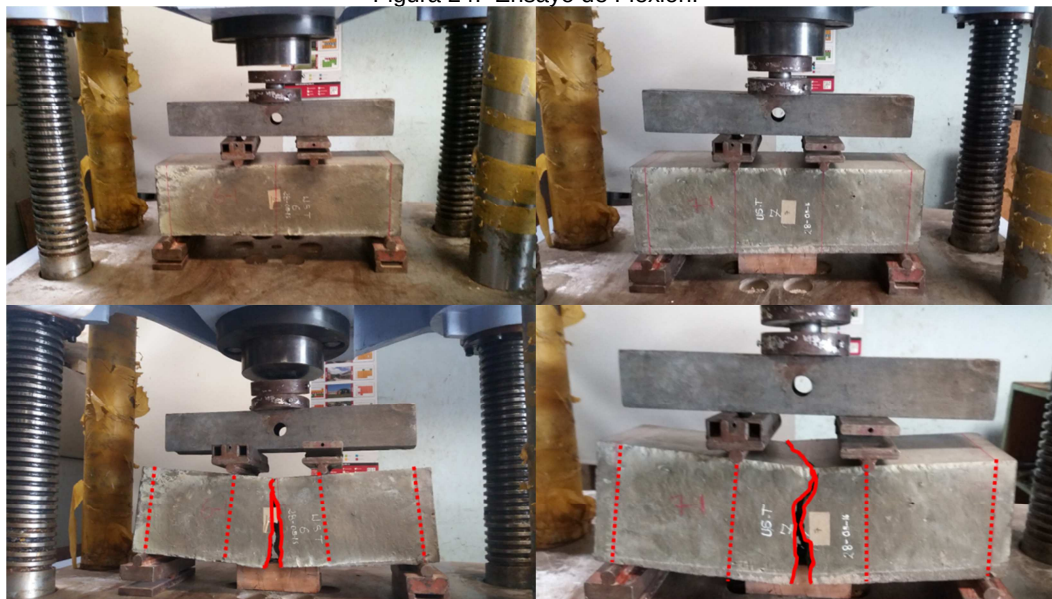
VIGA No.	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (cm)				CARGA MAX. (kgf)	MR (Kg/cm ²)	MR promedio (Kg/cm ²)
		LARGO	ANCHO	ALTO	LUZ			
6-1	75% NAT 25% CARB	50	15,3	15,1	45	3.556	46,0	45,4 (4.5 MPa)
			15,3	15,0				
			15,2	15,2				

VIGA No.	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (cm)				CARGA MAX. (kgf)	MR (Kg/cm ²)	MR promedio (Kg/cm ²)
		LARGO	ANCHO	ALTO	LUZ			
6-2		50	15,1	15,4	45	3.566	44,8	
			15,4	15,1				
			15,2	15,5				
7-1	50% NAT 50% CARB	50	15,1	15,2	45	3.184	41,3	39,2 (3,9 MPa)
			15,3	15,1				
			15,2	15,1				
7-2	50% NAT 50% CARB	50	15,1	15,0	45	2.836	37,0	
			15,2	15,2				
			15,4	15,0				

Fuente: Propia.

En la Figura 24 se muestra la realización del ensayo a flexión para Mezclas Tipo 6 y Tipo 7, en las cuales se puede observar la rotura de todas las vigas se dio en el tercio medio de la luz. Además se realizó la prueba de Fenolftaleína al 1%, la cual indica si los agregados están carbonatados o no. El color púrpura indica que hay no hay carbonatación y la no coloración indica que los agregados están carbonatados.

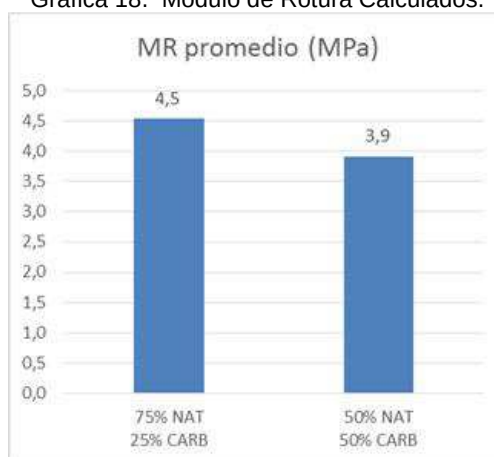
Figura 24. Ensayo de Flexión.



Fuente: Propia.

En la Gráfica 18 se muestran los resultados del ensayo de Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.

Gráfica 18. Módulo de Rotura Calculados.



Fuente: Propia.

Luego de analizar los resultados, se identifica que el módulo de rotura para las dos mezclas de la Tabla 25, cumplen con la especificación técnica de construcción de INVIAS en su artículo 500, Pavimento De Concreto Hidráulico, en la tabla 500-6 Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico, como se puede observar en la Tabla 26.

Tabla 26. Criterios de Diseño para la Mezcla de Concreto en Pavimentos de Concreto Hidráulico.
Tabla 500 - 6. Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Resistencia a la flexotracción a veintiocho (28) días, mínimo (MPa): - Tránsito NT1 - Tránsito NT2 - Tránsito NT3 (Nota 1)	E-414	3.8 4.0 4.2
Contenido de cemento en masa por m ³ de concreto, mínimo (kg) - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	300 350
Relación agua / material cementante, máximo - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	0.48 0.45
Asentamiento (mm): - Formaleta fija - Formaleta deslizante	E-404	25 a 50 13 a 38

Fuente: Propia.

Los Módulos de rotura para las mezclas analizadas cumplen el requerimiento de diseño para un nivel mínimo de tránsito 2, Tabla 27.

Tabla 27. Niveles de Tránsito.
Tabla 100 - 1. Niveles de Tránsito

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Propia.

En el estudio de (Jiménez, 2013) para los Agregados Reciclados indica que éstos pueden ser una alternativa en carreteras con intensidades de tráfico medio y bajo. Con esta investigación se demuestra que también los ARC carbonatados óptimos pueden ser utilizados para estas mismas solicitudes.

En flexión, según (Bojacá Castañeda, 2013), el concreto con 20% de remplazo tuvo un módulo de rotura similar a la muestra con 100% Agregados Naturales, mientras que hubo una disminución de un 10% para concreto con 40% de reemplazo. De acuerdo a lo evidenciado en la Gráfica 18 en las vigas de concreto ensayadas con ARC carbonatados óptimos, al aumentar el porcentaje de reemplazo se disminuyó el valor del módulo de rotura.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de la primera etapa de programa experimental referentes al proceso de carbonatación acelerada para agregados gruesos reciclados de concreto, indican que los parámetros para obtener la fijación óptima de CO_2 al agregado corresponden a temperatura 23°C , humedad del ARC seco al horno, tiempo de exposición de dos semanas para tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", concentración de CO_2 del 10% (máxima de la cámara) y humedad relativa de 65%, determinación de parámetros que permite conocer el proceso de fijación óptima del CO_2 a los ARC gruesos de manera controlada.

El proceso de carbonatación acelerada en agregados reciclados de concreto con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " mejora algunas características respecto al mismo agregado no carbonatado, como lo es el aumento de densidad, disminución del porcentaje de absorción y mejora del desempeño en presencia de Sulfatos, ver Tabla 17. Estos resultados nos indican que los ARC carbonatados óptimos pueden ser utilizados en obras para carreteras que se encuentran expuestas a ambientes salinos agresivos (costeros), sin embargo se recomienda realizar ensayos adicionales y específicos para estandarizar este uso. No obstante lo anterior, es importante indicar que el ARC y el ARC carbonatado óptimo cumplen los requerimientos solicitados en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) del año 2013, en el Artículo 500, Pavimento de Concreto Hidráulico, Ver Tabla 17, para las propiedades típicas que deben ser verificadas, como lo son las físicas, granulometría, dureza, durabilidad, limpieza, geometría de partículas, químicas, es decir pueden ser utilizados de manera masiva en vías vehiculares con concreto hidráulico en Colombia, lográndose beneficios ambientales en el desarrollo de la infraestructura vial del País.

Al revisar los resultados del programa experimental para la etapa 3, referentes al ensayo de resistencia a la compresión a 28 días para cada una de las 7 mezclas de concreto, identificamos que la mezcla realizada con 100% ARC carbonatado óptimo (tipo 5) y la mezcla realizada con 100% ARC (tipo 2) presentan los mejores resultados, siendo casi iguales a 36 MPa, es decir el proceso de carbonatación acelerada para los agregados reciclados de concreto gruesos no genera valor agregado en la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto.

Luego de realizar el ensayo para el cálculo del módulo de elasticidad estático a los 7 y 28 días, correspondiente a la etapa 3 del programa experimental, identificamos que las mezclas de concreto realizadas con participación total o parcial de ARC carbonatado óptimo, es decir las tipo 5 a tipo 7, presentaron un incremento promedio de los 7 a 28 días de 10.321 MPa, sin embargo las mezclas de concreto con participación total o parcial de ARC, es decir las tipo 2 a tipo 4, presentaron un incremento promedio de los 7 a 28 días de sólo 3.992 MPa, resultados que nos demuestran que el proceso de carbonatación acelerada para los agregados reciclados de concreto gruesos influye en el aumento del módulo de elasticidad estático de las mezclas de concreto y este incremento se potencia en el proceso de curado de las mezclas, razón por la cual recomendamos utilizar los ARC carbonatados en la construcción de vías vehiculares con concreto hidráulico en Colombia, lográndose beneficios ambientales en el desarrollo de la infraestructura vial y estructural del País.

10. PROPUESTA TRABAJOS FUTUROS

Teniendo en cuenta el desarrollo de este trabajo de grado, así como las conclusiones presentadas sugerimos desarrollar los siguientes temas por medio de trabajos Grado:

- Identificando que la pérdida de masa por ataques de sulfatos disminuye en los agregados reciclados carbonatados, producto del proceso de carbonatación acelerada, se recomienda ampliar los ensayos que permitan identificar con más detalle su comportamiento y estandarización de su uso de manera masiva en obras viales, ejecutadas en suelos con presencia de sulfatos (sodio, potasio, magnesio), aguas alcalinas.
- Teniendo en cuenta la resistencia de los agregados reciclados de concreto al ataque por sulfatos es necesario evaluar el comportamiento de mezclas de concreto para vías ante el ataque por sulfatos (sodio, potasio, magnesio).
- Concluyendo que las mezclas de concreto compuestas por 100% ARC Carbonatados gruesos presentaron una mejoría importante en la resistencia a la compresión, módulo de flexión, (módulo de rotura) de los 7 a los 28 días de edad, pasando a ser el mejor de las 7 mezclas de concreto estudiadas, nos lleva a recomendar estudiar este tipo de mezclas a edades mayores para determinar cuál es el tiempo en el cual se alcanza su mejor comportamiento.
- Determinado en este trabajo de grado que las mezclas de concreto compuestas por 100% ARC Carbonatados gruesos y 100% ARC gruesos cumplieron las especificaciones INVIA 2013, sugerimos realizar los procedimientos, determinar los costos y ejecutar los ensayos que permitan aumentar y estandarizar su uso en mezclas de concreto para vías vehiculares.
- Luego de revisar los resultados de este trabajo de grado respecto al cumplimiento de los agregados reciclados de concreto carbonatados gruesos de la norma INVIA 2013, consideramos que se puede desarrollar este mismo alcance de trabajo aplicado estructuras puntuales como edificaciones de vivienda y su cumplimiento de norma sismo resistente 2010.

BIBLIOGRAFÍA

Adserà Sáez, P. (2008). *Influencia de los áridos reciclados en la permeabilidad del hormigón*. Trabajo de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona, España.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría de Ambiente. (2012). *Control y Gestión ambiental a residuos peligrosos, orgánicos y escombros generados en Bogotá*. Plan de Desarrollo: Bogotá Humana. Programa: Basura Cero., Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría Distrital de Habitat. (2009). *Diagnóstico del manejo integral de escombros en Bogotá Distrito Capital*. Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos-UAESP, Bogotá.

Arriaga, L. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado*. Trabajo de Grado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Facultad de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.

ASOCRETO. (2011). Agregados reciclados presentes en la rehabilitación de estructuras. *Revista*, Edición 108 Página 62.

Barra, M., & Vázquez, E. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación con hormigón armado*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Bojacá Castañeda, N. R. (2013). *Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado*. Bogotá, Colombia.

Castaño, J., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes*. Bogotá: Tecnura Vol. 17 No. 38.

Cement & Concrete Association. (2011). *Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete*. New Zealand.

Etzeberria, Miren et al. (2003). *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Grupo de trabajo "Hormigón Reciclado".

Frías, M., & Goñi, S. (2013). *Accelerated carbonation effect on behaviour of ternary Portland cements*. Artículo, Eduardo Torroja Institute (IETcc-CSIC), Madrid, España.

Garcia Gonzalez, C. A., Grouh, N., Hidalgo, A., Fraile, J., Lopez Periago, A. M., Andrade, C., & Domingo, C. (2007). *New insights on the use of supercritical carbon dioxide for the accelerated carbonation of cement pastes*. Artículo, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC), Madrid, España.

Geng, J. (2013). *Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate*. Artículo, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Research Center of Green Building Materials and Waste Resources Reuse, Ningbo, China.

Guzmán, D. S. (2002). *Durabilidad y patología del concreto*. Bogotá, Colombia: Instituto del Concreto ASOCRETO.

Hiete, M. (2013). *Waste management plants and technology for recycling construction and demolition (C&D) waste: state- of-the- art and future challenges*. University of Kassel. Germany: Woodhead Publishing Limited.

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Colombia.

Jerga, J. (2004). *Physico-mechanical properties of carbonated concrete*. Construction and Building Materials.

Jiménez, J. (2013). *Recycled aggregates (RAs) for roads*. University of Córdoba. España: Woodhead Publishing Limited.

Kou Shi-Cong , Zhan Bao-Jian, Poon Chi-Sun. (2013). *Use of a CO2 curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates*. Artículo, The Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil and Environmental Engineering, Shenzhen, China.

Laverde, J. (2014). *Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados*. Trabajo de Grado, Maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.

Matallana Rodríguez, R. (2006). *Fundamentos de concreto aplicados a la construcción*. Medellín, Colombia: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Mulheron, M., & O'mahony, M. (1988). *The durability of recycled aggregates and recycled aggregate concrete*. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium.

Nordic Innovation Centre. (2005). *CO2 uptake during the concrete life cycle: Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete*. Christian J. Engelsen and Dag Henning Sæther (Norwegian Building Research Institute), Jacob Mehus (Standards Norway), Claus Pade (Danish Technological Institute), Oslo, Norway.

Nordic Innovation Centre. (2006). *CO2 uptake during the concrete life cycle: Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI, Stockholm, Sweden.

Otsuki, N. (2003). Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *Journal of materials in civil engineering*.

Sáez, P. A. (2008). *Influencia de los agregados reciclados en la permeabilidad del hormigón*. Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona, España.

Song, H., & Kwon, S. (2007). *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. Cement and Concrete Research.

Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejo, P. s., & Sánchez de Juan, M. (2012). *Durability of recycled aggregate concrete*. Artículo, University of Cantabria, Dept. of Science and Engineering of Materials, School of Civil Engineering, Madrid, España.

Torres Quiroga. (2010). *Concreto con agregados provenientes de escombros de construcción y demolición en Colombia*. Boletín Técnico, Seccional Colombiana del Instituto Americano del Concreto ACI, Bogotá, Colombia.

Turcry, P., Oksri-Nelfia, L., Younsi, A., & Aït-Mok, A. (2014). *Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning*.

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2013). *Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo, y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción*. Informe Final Contrato 1351 1. Ecoingeniería S.A.S., Cali.

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2014). *Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero. Informe Final Contrato No. 19547-004-2013. Ccio Proyección*. Bogotá.

Yanfeng Fang, Jun Chang Chang. (2014). *Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation*. Artículo, Dalian University of Technology, School of Civil Engineering, Liaoning, China.

ANEXOS

Anexo A. Formatos de Laboratorio de los Ensayos Realizados.

Anexo B. Manual de la Cámara de Carbonatación.

Anexo C. Cronograma Actualizado.

Anexo D. Presupuesto de Ejecución.

Anexo E. Cálculos de los Ensayos en Concretos.