

## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto elaborado con agregados finos reciclados procedentes del concreto sometidos a un proceso de carbonatación acelerada.**

**Genderson Hernando Novoa Suarez.**

**Bogotá, D.C., 17 de noviembre de 2017**



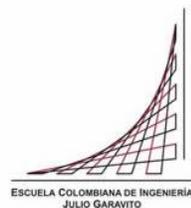
**Propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto elaborado con agregados finos reciclados procedentes del concreto sometidos a un proceso de carbonatación acelerada.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en estructuras**

**Nancy Torres Castellanos, Ph.D.**

**Director**

**Bogotá, D.C., 17 de noviembre de 2017**



NOTA DE ACEPTACIÓN:

El Proyecto de Grado denominado “Propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto elaborado con agregados finos reciclados procedentes del concreto sometidos a un proceso de carbonatación acelerada” presentado para optar al Título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

---

M. Sc, Ph.D. Nancy Torres Castellanos  
Directora de trabajo de grado

---

M.Sc. José Gabriel Gómez Cortes  
Jurado

---

M.Sc. Ricardo Matallana  
Jurado

Bogotá D.C., diciembre 14 de 2017.

A mi esposa Claudia y mis hijos Oscar y  
Leonardo por su comprensión y apoyo  
incondicional.

Genderson

## **Agradecimientos**

El autor expresa su agradecimiento a:

La ingeniera Nancy Torres Directora del Trabajo de Grado, por sus valiosas enseñanzas, y su constante colaboración.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería y su Laboratorio de Materiales.

## Resumen

El continuo desarrollo y crecimiento de la actividad edificadora a nivel mundial y en Colombia, genera tranquilidad en los integrantes de este sector. Sin embargo, es preocupante la generación de escombros que este crecimiento trae consigo y la disposición final de este material, la cual se debe realizar en sitios adecuados como escombreras y sitios de aprovechamiento (SDA, Guía Ambiental Para el Manejo de Escombros en la Ciudad de Bogotá D.C.), como una alternativa a la reutilización de los residuos de construcción y demolición, en el caso específico del concreto, se plantea el presente proyecto, donde agregados finos reciclados sometidos a un proceso de carbonatación acelerada se incorporan en nuevas mezclas de concreto y se evalúan algunas propiedades mecánicas y de durabilidad de estos nuevos concretos

Adicionalmente, en este trabajo, se realiza una compilación de algunos resultados encontrados en los últimos diez (10) años de investigaciones en diferentes partes del mundo, con agregados reciclados de concreto carbonatados (ARCC) y sin carbonatar (ARC), que incluyen muestras con diferente porcentaje de sustitución de agregado natural.

La metodología utilizada durante el desarrollo del proceso investigativo correspondió al método experimental con enfoque cuantitativo. Como herramientas de investigación se utilizaron el análisis documental de la literatura disponible, y la comparación investigativa de documentos vigentes relacionados con el tema referente al uso de los agregados reciclados proveniente del concreto. En cuanto al programa experimental desarrollado en el presente proyecto, se elaboraron muestras de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de agregados finos naturales (AFN) por agregados finos reciclados de concreto carbonatados (AFRCC) y no carbonatados (AFRC). La fase experimental se desarrolló en tres (3) etapas; caracterización de materiales, elaboración de mezclas y campaña de ensayos a diferentes edades (7, 28, 90, 180 y 360 días) y finalmente análisis de resultados.

En este estudio se puede ver claramente que la resistencia de los concretos, no siempre está relacionada con la durabilidad y su desempeño frente a las acciones agresivas a las que puede estar expuesto. Las adiciones y/o sustituciones en los concretos deben ser estudiadas y analizadas con cuidado, evaluando siempre las propiedades mecánicas y de durabilidad, con el fin de encontrar el verdadero desempeño y funcionalidad.

## Tabla de Contenidos

Introducción.....	19
Capítulo 1 Marco Teórico .....	21
<b>1.1 Agregados para concreto .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Agregados reciclados de concreto (ARC).....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 Carbonatación del concreto.....</b>	<b>23</b>
<b>1.4 Carbonatación acelerada del concreto. ....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Tecnologías de captura y almacenamiento de CO2 (CAC) .....</b>	<b>24</b>
Capítulo 2 Estado del Arte .....	27
<b>2.1 Concretos fabricados con agregado reciclado de concreto.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Concreto fabricado con agregado reciclado de concreto carbonatado. ....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.1 Carbonatación de los agregados reciclados de concreto.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2 Propiedades mecánicas de los concretos y morteros elaborados con agregados reciclados de concreto carbonatado (ARCC).....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3 Propiedades de durabilidad de los concretos y morteros con ARCC.....</b>	<b>34</b>
Capítulo 3 Objetivos.....	37
Capítulo 4 Programa experimental.....	38
<b>4.1 Metodología.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Caracterización de los Materiales.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.1 Cemento.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2 Aditivos.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.3 Agregado grueso (AGN).....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.4 Agregado fino natural (AFN) .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.5 Agregado fino reciclado de concreto (AFRC).....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.6 Agregado fino reciclado de concreto carbonatado (AFRCC) .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Elaboración de mezclas.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.1 Asentamiento y contenido de agua.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.2 Relación agua / cemento (a/c) y resistencia a la compresión esperada.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.3 Optimización de la granulometría.....</b>	<b>45</b>

4.3.4	Dosificación de las mezclas de concreto.....	46
4.3.5	Elaboración y curado de probetas. ....	47
4.4	Ensayos en el concreto.....	48
4.4.1	Asentamiento, peso volumétrico y contenido de aire. ....	49
4.4.2	Resistencia a la compresión. ....	49
4.4.3	Módulo de elasticidad.....	50
4.4.4	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	51
4.4.5	Resistencia a la tracción indirecta (ftc).....	51
4.4.6	Prueba rápida de permeabilidad de cloruros .....	52
4.4.7	Tasa de absorción superficial inicial ISAT .....	52
4.4.8	Sortividad .....	53
4.4.9	Resistencia a sulfatos .....	54
4.4.10	Cambio volumétrico del concreto .....	54
Capítulo 5 Resultados y Discusión de Resultados.....		56
5.1	Tratamiento a los Agregados.....	56
5.2	Asentamiento, peso volumétrico y contenido de aire. ....	57
5.3	Resistencia a la compresión. ....	58
5.4	Módulo de elasticidad.....	61
5.5	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	63
5.6	Resistencia a la tracción indirecta (ftc).....	64
5.7	Prueba rápida de permeabilidad de cloruros (RCPT).....	66
5.8	Tasa de absorción superficial inicial ISAT .....	68
5.9	Sortividad .....	71
5.10	Resistencia a sulfatos .....	73
5.10.1	Expansión por sulfatos .....	76
5.11	Cambio Volumétrico del concreto.....	76
Conclusiones.....		78
Recomendaciones .....		81
Referencias .....		82

Anexos .....	87
<b>1) Resistencia a la compresión .....</b>	<b>87</b>
<b>Mezcla 1 .....</b>	<b>87</b>
<b>Mezcla 2 .....</b>	<b>87</b>
<b>Mezcla 3 .....</b>	<b>87</b>
<b>Mezcla 4 .....</b>	<b>87</b>
<b>2) Sortividad .....</b>	<b>89</b>
<b>a) Mezcla 1 .....</b>	<b>90</b>
<b>b) Mezcla 2 .....</b>	<b>90</b>
<b>c) Mezcla 3 .....</b>	<b>91</b>
<b>d) Mezcla 4 .....</b>	<b>92</b>
<b>e) Mezcla 5 .....</b>	<b>92</b>

## Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros Químicos Especificados por Argos. ....	38
Tabla 2. Parámetros Físicos Especificados por Argos. ....	39
Tabla 3. Porcentaje de sustitución de las muestras.....	44
Tabla 4. Cantidades definitivas de material para las diferentes mezclas.....	47
Tabla 5. Listado de ensayos.....	48
Tabla 6. Peso unitario, densidad y absorción de los AFR .....	56
Tabla 7. Resultados de asentamiento, masa unitaria y contenido de aire.....	57
Tabla 8. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión. ....	58
Tabla 9. Resistencia a la compresión relativa respecto a la muestra patrón.....	59
Tabla 10. Módulo de elasticidad Relativo respecto a la muestra patrón. ....	62
Tabla 11. Relación $E_c / f'_c$ .....	63
Tabla 12. Resultados VPU (m/s). ....	63
Tabla 13. Resultados a la tracción indirecta (MPa).....	64
Tabla 14. Resultados a la tracción indirecta relativa. ....	65
Tabla 15. Relación $K_{ft}$ .....	66
Tabla 16. Carga transmitida en la prueba RCPT .....	66
Tabla 17. Permeabilidad al ion cloruro basado en la carga transmitida .....	67
Tabla 18. Tasa de absorción superficial. ....	68
Tabla 19. Tasa de absorción superficial a los 28 días. ....	71
Tabla 20. Tasa de absorción superficial a los 180 días. ....	71
Tabla 21. Resistencia a la compresión de las muestras expuestas a sulfatos. ....	73
Tabla 21. Variación de la resistencia a la compresión de las muestras expuestas a sulfatos respecto a las muestras curadas en agua. ....	74
Tabla 22. Evaluación del desempeño a los 28 días .....	78
Tabla 23. Evaluación del desempeño a los 180 días .....	79

## Lista de figuras

Figura 1. Curva granulométrica agregado grueso natural. Fuente: propia. ....	40
Figura 2. Curva granulométrica agregado fino natural. Fuente: propia. ....	41
Figura 3. Triturado de material. Fuente: propia. ....	41
Figura 4. Curva granulométrica agregado fino natural. Fuente: Propia. ....	42
Figura 5. ARC en la cámara de carbonatación acelerada. Fuente: Propia. ....	43
Figura 6. ARC carbonatado (ARCC). Fuente: Propia. ....	43
Figura 7. Correspondencia entre la resistencia a compresión y la relación a/c para los cementos colombianos, portland tipo I en concretos sin aire incluido. (Sanchez, 2001) ....	45
Figura 8. Optimización granulométrica. Fuente: Propia. ....	46
Figura 9. Fundida de cilindros y viguetas de concreto. Fuente: Propia. ....	47
Figura 10. Curado de cilindros de concreto (Derecha Piscina, izquierda cámara de curado). Fuente: Propia. ....	48
Figura 11. Ensayos de asentamiento, masa unitaria y contenido de aire. Fuente: Propia. ...	49
Figura 12. Ensayos de compresión. Fuente: Propia. ....	50
Figura 13. Izquierda-Ensayo módulo de elasticidad. Derecha-Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Fuente: Propia. ....	50
Figura 14. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ftc). Fuente: Propia. ....	51
Figura 15. Montaje tipo prueba rápida de permeabilidad de cloruros Gómez (citado por (Bojacá, 2013)). ....	52
Figura 16. Montaje ISAT. Fuente: Propia. ....	53
Figura 17. Montaje ensayo sortividad. Fuente: Propia. ....	53
Figura 18. Muestras de concreto sumergidas en una solución de sulfato de magnesio. Fuente: Propia. ....	54
Figura 19. Viguetas en cámara de curado y sumergidas en una solución de sulfato de magnesio. Fuente: Propia. ....	55
Figura 20. Peso unitario AFRC y AFRCC. Fuente: Propia. ....	56
Figura 21. Asentamiento, masa unitaria y contenido de aire. Fuente: Propia. ....	58
Figura 22. Curva de resistencia a la compresión muestras de concreto. Fuente: Propia. ....	60
Figura 23. Resistencia a la compresión de muestras de concreto. Fuente: Propia. ....	60
Figura 24. Resistencia a la compresión de muestras de concreto a diferentes edades. Fuente: Propia. ....	61
Figura 25. Resultados módulo de elasticidad. Fuente: Propia. ....	62
Figura 26. Resultados VPU. Fuente: Propia. ....	64
Figura 27. Resultados resistencia a la tracción indirecta. Fuente: Propia. ....	65
Figura 28. Resultados penetración de cloruros a los 28 días. Fuente: Propia. ....	67
Figura 29. Tasa de absorción superficial inicial a 10 min. Fuente: Propia. ....	69
Figura 30. Tasa de absorción superficial inicial a 20 min. Fuente: Propia. ....	69
Figura 31. Tasa de absorción superficial inicial a 30 min. Fuente: Propia. ....	70
Figura 32. Tasa inicial de absorción. Fuente: Propia. ....	72
Figura 33. Tasa Secundaria de absorción. Fuente: Propia. ....	72
Figura 34. Resistencia a la compresión mezcla 1 sulfatos. Fuente: Propia. ....	73
Figura 35. Resistencia a la compresión mezcla 2, 3, 4 y 5 sulfatos. Fuente: Propia. ....	74

Figura 36. Módulo de elasticidad de las muestras expuestas a sulfatos. Fuente: Propia.....	75
Figura 37. Evolución muestras expuestas a solución de sulfatos. Fuente: Propia.....	75
Figura 38. Expansión del concreto por exposición a sulfatos. Fuente: Propia. ....	76
Figura 39. Cambio volumétrico del concreto. Fuente: Propia.....	77

## Introducción

El continuo desarrollo y crecimiento de la actividad edificadora en Colombia (Camacol, 2015), genera tranquilidad en los integrantes de este sector. Sin embargo es preocupante la generación de escombros que este crecimiento trae consigo y la disposición final de este material, la cual se debe realizar en sitios adecuados como escombreras y sitios de aprovechamiento (SDA). En la ciudad de Bogotá la secretaria distrital del medio ambiente (SDA), preocupada por esta problemática emitió en 2012 “Los lineamientos técnico ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el distrito capital” (SDA, 2012). En estos lineamientos se establecen parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar la recolección, inventarios y selección de materiales reutilizables.

En la actualidad los proyectos sostenibles tienen como objetivo principal la reducción del impacto en el medio ambiente, aprovechando al máximo los recursos naturales, incentivando la utilización de recursos reciclables y renovables en la construcción y teniendo una mayor eficiencia en las técnicas de construcción (CCCS, s.f.).

Se ha encontrado que la utilización de materias primas recicladas de RCD, pueden presentar ahorros del 25 % en el costo del material, tomando como referencia el precio de los agregados naturales y los precios de plantas de aprovechamiento y procesamiento de RDC (Escandon, 2011), constituyéndose este en uno de los incentivos más significativos para continuar con las investigaciones sobre la utilización de este tipo de materiales.

Por otra parte, se ha encontrado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos elaborados con agregados reciclados de concreto (ARC) son inferiores a las de concretos elaborados con agregados naturales, como lo muestra (Bojacá, 2013) y (Laverde, 2014). Adicionalmente encontraron que los agregados reciclados presentan mayor absorción y menor densidad que los agregados naturales, convirtiéndose este en uno de los factores que influyen en la resistencia de los concretos elaborados con agregados reciclados.

Con el fin de profundizar en el comportamiento de los concretos con porcentaje de sustitución de agregados naturales por agregados reciclados de concreto carbonatados, se evaluaron algunas de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto elaborado con agregados finos reciclados procedentes del concreto y sometidos a un proceso de carbonatación acelerada, para determinar respecto a una muestra patrón, si dichos agregados mejoraban las propiedades mecánicas y de durabilidad de nuevos concretos. Para esto, se realizó una revisión documental, con el fin de conocer antecedentes de concretos elaborados con sustitución de agregado natural (AFN) por agregado reciclado de concreto (AFRC), seguido de la consecución de los agregados, para luego someterlos a un proceso de carbonatación acelerada. Posteriormente, se elaboraron muestras de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de AFR, las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia y durabilidad, con el fin de determinar si el uso de agregados finos reciclados sometidos a carbonatación acelerada mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad de nuevos concretos.

Durante la fase experimental y la campaña de ensayos a diferentes edades (7, 28, 90, 180 y 360 días), se pudo evidenciar que la resistencia de los concretos, no siempre está relacionada con la durabilidad y su desempeño frente a las acciones agresivas a las que puede estar expuesto. Cada muestra es única y las adiciones y/o sustituciones en los concretos deben ser estudiadas y analizadas con cuidado, evaluando siempre las propiedades mecánicas y de durabilidad, con el fin de encontrar el verdadero desempeño y funcionalidad.

Este trabajo contribuye con el desarrollo y estudio de nuevas técnicas de tratamiento de los agregados reciclados y da continuidad a diferentes trabajos de investigación que se han venido desarrollando en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI), como es el de (Bojacá, 2013), (Laverde, 2014), (Molano, Torres, & Molano, 2014) y (Muñoz, 2016) dirigidos a conocer, comparar y validar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los concretos fabricados con agregados reciclados.

# Capítulo 1

## Marco Teórico

En este capítulo se encuentran recopilados algunos conceptos básicos acerca del proceso de carbonatación y el efecto que produce sobre los agregados reciclados de concreto. Se describen algunos parámetros de los concretos elaborados con agregados reciclados, sus propiedades y sus posibles usos en la industria de la construcción.

### 1.1 Agregados para concreto

Los agregados en el concreto constituyen entre el 65 y el 70% del total de la mezcla, reduciendo el contenido de pasta de cemento por  $m^3$ , ayudando a controlar cambios volumétricos y aportando a la resistencia final de material. Estos se pueden clasificar por su origen (Ígneo, sedimentario y metamórfico), color, tamaño (agregado fino y grueso), por su fragmentación (Natural, manufacturada y mixta), peso específico (Ligero, normal y pesado) y finalmente por su procedencia, como los agregados reciclados. Estos agregados pueden ser agregados limpios los cuales tienen un porcentaje de impurezas muy bajo (5%) y los agregados reciclados sucios (Silva , 2017).

### 1.2 Agregados reciclados de concreto (ARC)

En el mundo actual, el reciclaje se ha convertido en la manera más efectiva y adecuada de disminuir el consumo de los recursos naturales. Esta situación no es diferente en el sector de la construcción, el cual genera aproximadamente 15 millones de  $m^3/año$  de residuos (ARC) de acuerdo con el análisis realizado por (Chávez & Guarín, 2014).

En los países nórdicos la producción de escombros se encontraba en el año 2005 entre los 0.6 y 1.2 millones de toneladas. La producción de agregados reciclados estaba en el rango de 0.2 a 1.0 millones de toneladas, correspondiente a un nivel de reciclaje de 30-90%. En Noruega, Finlandia y Suecia, el nivel actual de reciclaje está en 30, 50 y 60% respectivamente. En 2005

Dinamarca reportó un nivel de reciclaje del 90% el cual esperan seguir manteniendo. (Engelsen , Henning , Mehus, & Pade, 2005).

En países como Japón y Alemania es obligatorio que clientes y contratistas desarrollen actividades de reciclaje, como una actividad ineludible dentro de los proyectos, mientras que en Finlandia todo el material resultante de la demolición debe ser reciclado. En Colombia el porcentaje de aprovechamiento de los ARC es muy bajo, comparado con países con un desarrollo superior. Esta situación se presenta debido a la falta de incentivos y normas que promuevan de manera efectiva el uso de agregados reciclados de concreto (ARC) (Guacaneme, 2015).

Aproximadamente el 60% de los ARC producidos en Bogotá, puede ser reutilizados en la elaboración de nuevos concretos, si se implementa un adecuado proceso de separación, clasificación, triturado y cribado (Chávez & Guarín, 2014). Este es quizá el punto más importante en la utilización de los agregados reciclados, ya que para la elaboración de concretos estructurales, el agregado debe estar limpio y libre de materia orgánicos que alteren sus propiedades físicas y mecánicas. Con estas limitaciones a la hora de utilizar ARC, muchas empresas han incrementado sus esfuerzos, con el fin de suministrar materiales adecuados y de alta calidad. Es así como en el mes de diciembre de 2017 la empresa “*Granulados Reciclados De Colombia*” (GRECO), realizó la inauguración de una de las plantas de aprovechamiento más moderna de Latinoamérica, capaz de procesar un millón de toneladas de ARC al año, garantizando los estándares y especificaciones de los agregados exigidos por la normatividad vigente (GRECO, 2017). En Bogotá existen otros proveedores que cuentan con lugares aprobados por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), como sitio de aprovechamiento y tratamiento de residuos de construcción y demolición. Este es el caso de Reciclados Industriales de Colombia S.A.S., CICLOMAT S.A.S. y CODEOBRAS S.A.S. (IDU, 2017). En la ciudad de Pasto en el departamento de Nariño, la empresa “*emas de Pasto*” se encarga de realizar la clasificación y aprovechamiento de los ARC, reduciendo el porcentaje de contaminación de los agregados reciclados para ser utilizados en la fabricación de prefabricados para la construcción (Emas, 2016). Dado este panorama y la posibilidad de encontrar agregados reciclados de concretos clasificados, es importante continuar con el

estudio de nuevos concretos elaborados con estos agregados, garantizando su buen desempeño y ayudando a disminuir el consumo de los recursos naturales.

### **1.3 Carbonatación del concreto**

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro cuya estructura molecular está compuesta por un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno. Este gas se encuentra presente en la naturaleza de manera imprescindible para conservar el equilibrio a través del ciclo del carbono, el cual comprende un ciclo biológico y un ciclo biogeoquímico que son esenciales para regular el clima y la vida en el planeta (Sordo, 2010).

La carbonatación en los concretos es un fenómeno natural producido por la penetración por difusión del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la estructura porosa del concreto que, al disolverse, reacciona con los componentes alcalinos de la fase húmeda del concreto, produciendo ácido carbónico. Este ácido transforma el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , liberado y depositado en los poros durante la hidratación del concreto en carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  y agua. Luego de esta reacción se produce un descenso en el pH en la capa superficial del concreto de 13 a valores cercanos a 9, haciendo perder al concreto su basicidad. Esto hace que el concreto deje de ser un elemento protector del acero de refuerzo y pierda el efecto de capa pasivadora a medida que avanza el frente de carbonatación. (Sanchez, 2001).

La velocidad con la cual se produce el avance del frente de carbonatación en los concretos, depende de diversos factores como la humedad relativa, la relación a/c, el tipo de cemento, la calidad y duración del curado del concreto, el uso de adiciones o sustituciones en la mezcla entre otros. (Novoa, 2010).

### **1.4 Carbonatación acelerada del concreto.**

Debido al bajo contenido de  $\text{CO}_2$  (0.04% en volumen) en la atmósfera y la densidad de algunos concretos, el fenómeno de la carbonatación en el concreto puede demorar varios años. Por esta razón se han establecido relaciones en cuanto a la absorción de  $\text{CO}_2$  en condiciones naturales y condiciones de humedad relativa (HR) y concentración de  $\text{CO}_2$

en cámaras especiales, con el fin de simular situaciones naturales de carbonatación en periodos cortos de tiempo.

En su investigación (Galán, 2011), determinó relaciones de carbonatación en función de la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub>, encontrando que a bajas humedades no existe suficiente agua en los poros del concreto para disolver las fases implicadas y permitir su reacción. A humedades relativas intermedias se consiguen condiciones óptimas para la carbonatación, suficiente agua para la disolución, y también suficiente espacio para la difusión del CO<sub>2</sub>. Determinó que las constantes de tiempo para la carbonatación natural se encuentran entre 500 y 3500 veces la carbonatación acelerada. Esto significa que en una atmosfera de 53% de HR y una concentración del 100% de CO<sub>2</sub> equivale a unas 3000 horas (125 días) de carbonatación natural en el exterior; En una atmosfera con HR de 65% con una concentración de CO<sub>2</sub> del 100% equivale a 870 horas (36 días) de carbonatación natural en el exterior y Por último, una hora de carbonatación al 100% de CO<sub>2</sub> en atmósfera de 75% de HR equivale a aproximadamente 665 horas (28 días) de carbonatación natural en el exterior. Adicionalmente encontró que los valores de ganancia de peso de las muestras por carbonatación en función de la HR alcanzan su valor máximo alrededor del 52% para las probetas de a/c 0,5 y del 61% para las de a/c 0,45.

## **1.5 Tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC)**

A partir de la revolución industrial y debido al incremento en la utilización de combustibles fósiles y biomasa (petróleo, carbón, incendios, etc...), la aparición de las grandes ciudades y la desaparición de los bosques, han aumentado considerablemente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmosfera, generando un desequilibrio natural que se ve reflejado en el aumento de la temperatura a causa del efecto invernadero. (Sordo, 2010).

Alrededor de 0.8% toneladas de CO<sub>2</sub> se producen en la fabricación del cemento, de las cuales el 60 % de las emisiones provienen de la descarbonatación de la materia prima de carbonato de calcio para obtener CaO y el 40% restante de la utilización de combustibles fósiles. (Galán, 2011)

El protocolo de Kioto firmado en 1998, tenía como objetivo principal generar un acuerdo internacional con el fin de reducir las emisiones de seis (6) gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, entre los que se encuentra el CO<sub>2</sub>. (Minambiente, 2017).

Con el fin de cumplir con este compromiso, se han venido desarrollando diferentes técnicas que permitan la captura y posterior almacenamiento de estos gases (CAC), los cuales dependen del modo en que se realice la captura (Clemente & Naharro, 2009).

De acuerdo con lo establecido por (Bobicki, Liu, Xu, & Zeng, 2012), el CAC es un proceso que se divide en tres pasos que consisten en:

- a) Separación de CO<sub>2</sub> de las corrientes de desechos gaseosos
- b) Transporte de CO<sub>2</sub> a ubicaciones de almacenamiento y
- c) Aislamiento a largo plazo del CO<sub>2</sub> de la atmósfera (almacenamiento de carbono)

Por otra parte (Clemente & Naharro, 2009), resaltó tres métodos de separación de CO<sub>2</sub>, los cuales se explican a continuación:

- **Postcombustión:** Consiste en la utilización de un disolvente químico, el cual se coloca en contacto con la corriente de gas proveniente de la combustión, reaccionando con el CO<sub>2</sub> y separándolo de la corriente. Posteriormente es trasladado a otro reactor en donde el CO<sub>2</sub> concentrado es separado del absorbente. Las condiciones de la corriente de los gases de escape son el principal problema de este sistema debido al gran volumen, baja presión y presencia de impurezas. Esto unido a la baja concentración de CO<sub>2</sub>, hace que el sistema de separación deba ser muy eficiente, elevando la inversión económica y los requerimientos energéticos.
- **Pre combustión:** Mediante la gasificación se convierte el combustible en monóxido de carbono e hidrógeno. Luego de generar una reacción gas-agua (o reacción shift) se transforma el CO en CO<sub>2</sub>. De esta manera se produce un combustible libre de carbono, el cual puede ser utilizado en calderas, turbinas, pilas de combustible, etc. En este método, la separación se realiza a una mayor presión y con una concentración

de CO<sub>2</sub> mayor haciéndolo más eficiente en comparación con el de la postcombustión. Sin embargo, la etapa de procesamiento del combustible es su mayor debilidad.

- **Oxicombustión:** Consiste en realizar la combustión con oxígeno puro, obteniendo básicamente gases con CO<sub>2</sub> y aguas libres de nitrógeno, facilitando el proceso de separación del CO<sub>2</sub>. La necesidad de recircular grandes cantidades de gases, con el fin de mantener la temperatura de combustión y el alto costo de producción de oxígeno hacen que el costo sea elevado.

El almacenamiento de CO<sub>2</sub> se realiza mediante la inyección del CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas, en las masas de aguas profundas, o en forma de minerales carbonatados, siendo esta última, la única forma conocida de almacenamiento permanente de carbono. Se basa en el proceso geológico de meteorización natural en rocas donde el CO<sub>2</sub> disuelto en el agua lluvia reacciona con las rocas alcalinas formando minerales carbonatados. Aunque este proceso puede tardar miles de años, el desafío de la captura de carbono se centra en realizar la carbonatación acelerada de los materiales con pérdidas mínimas de energía y material. Entre los materiales que se han evaluado para realizar esta captura se encuentran los desechos provenientes de residuos alcalinos que incluyen las escorias de fabricación de acero, residuos de cemento, desechos de minería y procesamiento de minerales, cenizas de desechos y desechos de fábricas de papel alcalino (Bobicki, Liu, Xu, & Zeng, 2012).

A partir de la posibilidad de aplicar las técnicas de captura y recolección de CO<sub>2</sub> en procesos industriales, se vienen realizando estudios con la ayuda de cámaras de carbonatación acelerada, en donde se simulan las condiciones de exposición de dichos materiales al CO<sub>2</sub> y su comportamiento, en periodos de tiempo reducidos. En el siguiente capítulo se exponen algunos de estos trabajos y los resultados obtenidos.

## Capítulo 2

### Estado del Arte

#### 2.1 Concretos fabricados con agregado reciclado de concreto.

En la actualidad los proyectos sostenibles tienen como objetivo principal la reducción del impacto en el medio ambiente, aprovechando al máximo los recursos naturales, incentivando la utilización de recursos reciclables y renovables en la construcción y teniendo una mayor eficiencia en las técnicas de construcción.

En el análisis económico realizado por (Bedoya & Dzul, 2015), se muestra el beneficio que trae realizar mezclas de concreto con agregados reciclados, siendo estos un 65% más económicos que los agregados naturales. Indicando que el ahorro generado por el menor costo de los agregados, hace que se pueda utilizar una mayor cantidad de cemento, con el fin de obtener concretos con resistencias a la compresión más altas, mejorando las propiedades de durabilidad de los mismos.

Por otra parte, (Bedoya & Dzul, 2015) variaron el contenido de cemento y el porcentaje de agregado reciclado de concreto en la fabricación de nuevos concretos, con el fin de comparar su desempeño; reportando una disminución en la resistencia a la compresión del 16% en la mezcla elaborada con el 100 % de agregado reciclado de concreto (ARC) y del 3% en los concretos con el 25% de ARC, respecto de la muestra patrón.

De manera similar, (Evangelista & de Brito, 2007) experimentaron con agregados finos reciclados de concreto, elaborando diferentes tipos de mezcla, sustituyendo diferentes porcentajes de agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado de concreto (AFRC). Se apreció que la resistencia a compresión de algunas de las muestras estudiadas, no fue afectada por la sustitución del AFN por AFRC. Adicionalmente encontraron que la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad, disminuyen al aumentar el porcentaje de remplazo del AFRC, manteniéndose en niveles aceptables en la mezcla con un remplazo de AFN del 30%.

De otro lado, (Zega & Di Maio, 2011) realizaron un estudio similar, evaluando algunas propiedades de durabilidad de los concretos elaborados con AFRC y con un porcentaje de sustitución de hasta el 30%. Reportaron disminuciones menores en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad a los 28 días de edad de los concretos, atribuyendo este hecho a la disminución en la relación a/c efectiva en los concretos elaborados con AFRC. En los ensayos de permeabilidad al agua encontraron un aumento del 10% en los concretos con sustitución de AFN por AFRC; este mismo comportamiento se presentó en el ensayo de sortividad.

En la ciudad de Cali, (Mena & Valdés, 2014) realizaron un estudio sobre la cantidad optima de remplazo de agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado de concreto (AGRC) en mezclas de concreto para uso en obras viales de bajo tránsito. Utilizaron una relación agua/material cementante (a/mc) de 0.56, realizando tres mezclas con diferente porcentaje de sustitución de AGN (25%, 50% y 100%) que serían comparadas con la muestra de referencia elaborada con un 100% de AGN. Encontraron que la resistencia a la compresión disminuye a medida que se aumenta la cantidad de AGRC y que el porcentaje de sustitución optimo es del 25%. Por otra parte, la absorción promedio del AGRC (8.27%) fue muy superior respecto al AGN (2.07%) y la densidad del AGN ( $2653 \text{ kg/m}^3$ ) un 23% mayor que la obtenida para el AGRC ( $2154 \text{ kg/m}^3$ ).

De manera similar, (Zhao, Remond, Damidot, & Xu, 2015) experimentaron con arena reciclada de concreto. Concluyeron que la densidad fresca del mortero disminuye, debido a la menor densidad de la arena reciclada. Determinaron que la resistencia a la compresión de los morteros fabricados con sustituciones de agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado de concreto (AFRC) disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, de manera casi lineal.

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI) ha desarrollado diferentes estudios sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de los concretos con sustitución de agregados naturales (AN) por agregados reciclados de concreto como es el caso de (Bojacá, 2013), quien realizó su investigación sustituyendo el agregado grueso natural (AGN) por

agregado grueso reciclado de concreto (AGRC), proveniente de cilindros ensayados, almacenados en el laboratorio de estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Las muestras se elaboraron con una relación A/C=0.50, y se ensayaron a los 3, 28, 56 y 100 días. La muestra 1 (M1) fue elaborada con 100% AGN, la muestra 2 (M2) con un 20% de sustitución de AGN y la muestra 3 con un 40% de sustitución de AGN. Determino que la muestra M2 fue la que se comportó de mejor manera, alcanzando resistencias superiores a las muestras M1 y M3. En cuanto al módulo de elasticidad (Bojacá, 2013) concluyó que las muestras elaboradas con AGN son más rígidas en edades tempranas, invirtiéndose este comportamiento a los 56 y 100 días de edad de los concretos.

En general el estudio de (Bojacá, 2013) mostró que la muestra con el 20% de sustitución de AGN (M2), tuvo un comportamiento similar al de la muestra patrón (M1) en cuanto a las propiedades mecánicas del concreto. Con los ensayos de durabilidad realizados, encontró que el remplazo de agregado reciclado no produjo deterioro, mejorando levemente parámetros de resistencia a fenómenos como el de la carbonatación.

Otro de los trabajos referentes es el de (Laverde, 2014), el cual realizó un estudio variando la relación A/C (0.5 y 0.6) y elaborando cuatro mezclas por cada relación A/C, con diferentes porcentajes de sustitución (0%, 25%, 50% y 100%) de agregado grueso reciclado de concreto (AGRC). Los resultados de este estudio fueron similares a los obtenidos por (Bojacá, 2013), siendo más crítico el comportamiento de los concretos con relación A/C= 0.6.

Los trabajos realizados por (Evangelista & de Brito, 2007), (Zega & Di Maio, 2011), (Mena & Valdés, 2014), (Zhao, Remond, Damidot, & Xu, 2015), (Bojacá, 2013) y (Laverde, 2014) concuerdan que las mezclas de concreto o mortero con sustituciones entre el 20% y 30% de agregados naturales (AN) por agregados reciclados de concreto (ARC) tuvieron un desempeño similar a los elaborados únicamente con AN.

Con el objetivo de continuar investigando el comportamiento de los concretos con sustituciones de AN, se vienen desarrollando proyectos innovadores, utilizando técnicas y materiales que mejoren la calidad de los concretos; es así como se presenta la alternativa de carbonatar los agregados reciclados.

## 2.2 **Concreto fabricado con agregado reciclado de concreto carbonatado.**

Como se mencionó anteriormente, la única forma de almacenar el CO<sub>2</sub> de manera permanente es mediante la carbonatación de minerales. Por lo general los escombros provenientes de las demoliciones de construcción, tienden a ser de poco valor y se generan como parte del desarrollo de las ciudades cerca de fuentes puntuales de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los agregados reciclados de concreto ARC tienen un alto potencial de ser utilizados para el secuestro de CO<sub>2</sub>, debido a la alta fracción de masa de CaO (20 y 60%) y a que son altamente reactivos por sus pequeños tamaños de partículas (Bobicki, Liu, Xu, & Zeng, 2012). El agregado reciclado de concreto carbonatado (ARCC), podría reutilizarse en la fabricación de nuevos concretos, sirviendo como lugar final de disposición del CO<sub>2</sub> proveniente de la quema de combustibles fósiles y biomasa, utilizados en la industria y contribuyendo al desarrollo sostenible de la humanidad.

### 2.2.1 **Carbonatación de los agregados reciclados de concreto**

En las investigaciones realizadas con concretos fabricados utilizando sustitución de agregados naturales (AN) por agregados reciclados de concreto (ARC), se encontraron reducciones en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción del concreto, atribuidas en gran medida a la mayor absorción y menor densidad del ARC, afectando su resistencia al aplastamiento y adherencia a la nueva pasta de cemento. Con la carbonatación del ARC se pretende mejorar la dureza superficial del agregado reciclado, con el fin de consolidar la capa de mortero adherido y disminuir su porosidad, contribuyendo a la unión interfacial entre los ARC y la pasta de cemento en el nuevo concreto (Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014).

Por otra parte, (Engelsen , Henning , Mehus, & Pade, 2005) realizaron un estudio, en donde documentaron no solo la carbonatación durante la vida útil del concreto, sino también el uso de este como elemento secundario. Para esta investigación tuvieron que realizar la

carbonatación del agregado reciclado en el laboratorio, manteniendo la humedad relativa entre el 50 y 60%, una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  y una concentración máxima de  $\text{CO}_2$  de 35000 ppm (ppm medido por volumen). Encontraron que entre 60 y 80% del  $\text{CO}_2$  liberado durante la calcinación se reabsorbe por la mezcla de concreto dentro de los 20-35 días de exposición en muestras con relación A/C= 0.6. Determinaron que el proceso de carbonatación es mucho más rápido y efectivo en partículas pequeñas, debido a la superficie específica.

En su investigación, (García, Grouh, Hidalgo, & all, 2008) introdujeron pequeños fragmentos de pasta de cemento en una cámara de acero inoxidable elevando la temperatura a  $318^{\circ}\text{K}$  ( $44^{\circ}\text{C}$ ) y una presión de 20MPa, durante periodos de 2 y 7 horas. La carbonatación de la pasta de cemento redujo la permeabilidad del agua, debido al refinamiento de los poros. Concluyeron que la carbonatación acelerada en la pasta de cemento disminuye la posibilidad de transporte de fluidos agresivos a través de los poros aumentando la durabilidad del concreto.

Por otra parte, (Uenoa, Kawaib, Kobayashic, & et all, 2014) tomaron una muestra de agregado reciclado de concreto y midieron la cantidad de  $\text{CO}_2$  inmediatamente este fue triturado. Posteriormente la muestra fue expuesta al aire ambiente durante 28 días, simulando las condiciones y periodo de exposición general en las plantas de Japón, humedeciéndolo dos veces por semana. En promedio la cantidad de  $\text{CO}_2$  atrapada en el concreto reciclado fue de 8.5Kg de  $\text{CO}_2$ /ton AR, concluyendo que las partículas pequeñas fueron las que capturaron una mayor cantidad de  $\text{CO}_2$ .

De otro lado, (Molano, Torres, & Molano, 2014) procesaron los agregados finos reciclados de concreto (AFRC) en una cámara de carbonatación durante un periodo de 14 días, con humedad relativa del 65%, temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  y una concentración de  $\text{CO}_2$  del 6%. La disminución del porcentaje de absorción del agregado fue del 22.2% y el aumento en la densidad aparente fue del 5.8%.

(Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014) colocaron el ARC en un recipiente hermético y lo sometieron a diferentes periodos de exposición (6, 12, 24, 48 y 72 horas), manteniendo la humedad de los agregados y presión del gas  $\text{CO}_2$  constante (0.1 Bar). Encontraron que la

densidad de los ARC aumenta y la absorción disminuye significativamente, de acuerdo con el tiempo de exposición. Sin embargo, el aumento de la densidad y disminución de la absorción fue mínimo en las muestras con periodo de curado de 48 y 72 horas. Por esta razón consideraron que el tiempo de exposición óptimo era de 24 horas para las condiciones mencionadas.

De manera similar (Fröhlich, Hentges, & Kulakowski, 2014) realizaron un estudio con sustituciones del agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado de concreto (AGRC) y agregado grueso reciclado de concreto carbonatado (AGRCC). El AGRC se colocó en una cámara de carbonatación acelerada durante 7 días, con una humedad de 70% y una concentración de CO<sub>2</sub> del 10%. La carbonatación fue verificada mediante la aspersión de un indicador de fenolftaleína, que indica que el PH en el concreto se encuentra por debajo de 8.3.

Recientemente, (Monje & Rodríguez, 2016) estudiaron el comportamiento de mezclas de concreto, remplazando agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado de concreto carbonatado (AGRCC). En la etapa inicial encontraron los parámetros óptimos de fijación del CO<sub>2</sub> al AGCR, con la ayuda de una cámara de carbonatación acelerada. Encontraron que, con una temperatura constante de 23°C, una humedad de 65% y una concentración de CO<sub>2</sub> del 10%, es necesario dejar el material durante un periodo de 15 días en la cámara, para que la carbonatación del material sea total. En la etapa final elaboraron muestras de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de AGN por AGRCC y sin carbonatar, realizando ensayos de resistencia y módulo de elasticidad a los 7 y 28 días de edad, encontrando mejoras en los concretos con AGRCC, respecto de la muestra patrón.

En la fabricación de morteros, (Muñoz, 2016) utilizó agregado fino reciclado de concreto (AFRC) y agregado fino reciclado de concreto carbonatado (AFRCC). Determino que el AFRCC óptimo se obtiene después de 15 días de exposición en la cámara de carbonatación acelerada a una temperatura de 23°C, una humedad relativa del 65% y una concentración de CO<sub>2</sub> del 10%. Estos factores fueron similares a los establecidos por (Monje & Rodríguez, 2016).

## **2.2.2 Propiedades mecánicas de los concretos y morteros elaborados con agregados reciclados de concreto carbonatado (ARCC).**

Con el fin de conocer el comportamiento de los concretos con sustitución de AN por AGRCC y sin carbonatar (AGRC), (Fröhlich, Hentges, & Kulakowski, 2014) realizaron tres mezclas de concreto con relación agua – cemento (a/c) de 0.56, variando el tipo y contenido de agregado grueso (100% AN, 50% AGRC y 50 AGRCC). Encontraron que la carbonatación del AGRCC redujo la absorción de agua en un 1.79% en comparación con el AGRC. La resistencia a la compresión del concreto con AGRC fue un 13% mayor que la resistencia a la compresión del concreto con AGRCC. El asentamiento aumentó de 55 a 60 mm con un nivel de consistencia similar.

De manera similar, (Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014) elaboraron cilindros de concreto con una relación a/c de 0.50, ensayando los especímenes a los 3, 7, 28, y 90 días de edad. Las muestras fabricadas con ARCC obtuvieron valores de contracción por secado entre un 10% y 15% por debajo de las obtenidas en las muestras con ARC. Las muestras preparadas con ARCC arrojaron valores de resistencia a la compresión similares a los de la muestra de control, con reducciones entre el 1% y 5%. Las muestras con ARCC registraron valores de resistencia a la compresión entre 5% y 10% por encima de los obtenidos por la muestra de control a los 90 días de edad y el módulo de elasticidad obtenido por las muestras con ARCC fue un 5% menor a los 90 días de edad. Los resultados mostraron en general una mejoría entre las propiedades mecánicas del concreto elaborado con ARC carbonatado respecto a las mezclas con ARC sin carbonatar.

Por otra parte, (Molano, Torres, & Molano, 2014) observaron un mejor comportamiento en las mezclas de mortero con AFRCC en comparación con las muestras elaboradas con AFRC, sin embargo nunca fueron superiores a los resultados obtenidos es la muestra de control. La mezcla con sustitución de agregado con mejor desempeño fue la elaborada con el 25% de sustitución de AFN por AFRCC, siendo esta un 13.6% menor a la muestra de control.

(Monje & Rodríguez, 2016) Determinaron que las muestras de concreto elaboradas con AGRCC y AGRC no presentaron mayor diferencia en la resistencia a la compresión obtenida a los 7 y 28 días. Sin embargo, el módulo de elasticidad fue mayor en las mezclas elaboradas con sustitución parcial o total del AGN por AGRCC.

En su investigación, (Muñoz, 2016) realizó diez (10) mezclas de mortero, con dos relaciones a/mc (0.55 y 0.65) y variando el porcentaje de remplazo de material fino natural (AFN) por AFRC y AFRCC. Encontró que en las mezclas con relación a/mc=0.55 y con AFRCC, los resultados fueron mejores en comparación con la muestra control. Para las mezclas con AFRC cuando la sustitución fue del 25% se obtuvieron mejores resultados respecto a la muestra control.

En el caso de las muestras con relación a/mc= 0.65 ninguna de las mezclas tuvo un mejor desempeño respecto de la muestra control. (Muñoz, 2016) considera que no hubo un beneficio significativo por el uso de los AFRC, ya que la mayoría de las propiedades no alcanzan a ser compensadas por las ventajas del agregado reciclado carbonatado y sin carbonatar, concluyendo que esta relación a/c, no es propicia para el uso de agregados finos reciclados de concreto en las mezclas de mortero.

### **2.2.3 Propiedades de durabilidad de los concretos y morteros con ARCC**

Con el fin de profundizar y conocer las propiedades de durabilidad del concreto con agregados reciclados de concreto carbonatados, (García, Grouh, Hidalgo, & all, 2008) realizaron un estudio sobre muestras de concreto, concluyendo que la carbonatación acelerada en la pasta adherida a los agregados reciclados produce el refinamiento de los poros, disminuyendo la permeabilidad del agua, reduciendo la posibilidad de transporte de fluidos agresivos a través de los poros y aumentando la durabilidad del concreto.

(Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014) realizó pruebas de permeabilidad al ion cloruro a los 28 y 90 días de edad, obteniendo resistencias entre un 41% y 46% superiores de las muestras elaboradas con ARCC respecto de las muestras elaboradas con ARC sin carbonatar, debido

principalmente a la mejora en las propiedades de absorción del agregado. La muestra control mostró un comportamiento similar a las muestras elaboradas con ARCC.

En los ensayos de durabilidad realizados sobre mezclas de mortero por (Molano, Torres, & Molano, 2014), reportaron que la tasa de absorción inicial superficial (ISAT) para las mezclas con sustitución de AN por ARCC fue menor que la de la muestra control, atribuyendo este hecho al llenado del sistema de poros por la formación de productos de carbonatación de los ARCC. En el ensayo de sortividad reportaron valores superiores para las muestras elaboradas con agregados reciclados respecto a la muestra control. Sin embargo, obtuvieron valores de sortividad menores en las mezclas elaboradas con agregados reciclados de concreto carbonatados, respecto a las elaboradas con agregados reciclados sin carbonatar.

En mezclas de mortero con sustitución de agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado de concreto carbonatado (AFRCC) y con relación  $a/c=0.55$ , (Muñoz, 2016) obtuvo una mejora en los resultados de los ensayos de ISAT respecto a la muestra elaboradas con agregados sin carbonatar. En la mezcla con relación  $a/c=0.55$  las que tuvieron mejor desempeño fueron los morteros elaborados con agregado fino reciclado sin carbonatar (AFRC), obteniendo tasas incluso por debajo de la muestra control a los 180 días de edad.

En los ensayos de sortividad (Muñoz, 2016) reportó un buen comportamiento en las mezclas con sustitución de AFR en la tasa inicial de absorción. Esta mejora fue más evidente en las mezclas con relación  $a/c=0.65$ , en donde se obtuvieron tasas por debajo de la muestra control a los 180 días de edad. Adicionalmente midió el cambio volumétrico de barras de mortero a causa del secado, encontrando resultados similares a los 180 días de edad, a excepción de la mezcla con sustitución del 50% de AFN por AFRC, que obtuvo valores de contracción superiores a las demás, sobre todo en la mezcla con relación  $a/c=0.65$ .

En las muestras expuestas a la solución de sulfato, (Muñoz, 2016) reportó que la muestra con el mejor desempeño y menor contracción, fue la mezcla con relación  $a/c=0.55$  y un porcentaje de sustitución de AFN por AFRCC del 25%, incluso por encima de la muestra control. Sin embargo, para las mezclas con relación  $a/c=0.65$  la que tuvo el menor porcentaje de contracción fue la mezcla con un 50% de remplazo de AFN por AFRCC, atribuyendo esta disminución a la mayor densidad del material carbonatado.

A partir del estado del arte consultado y para continuar con la línea de investigación planteada en el grupo de materiales y estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se plantea el presente trabajo, el cual se basa en la posibilidad de utilizar los agregados reciclados de concreto (ARC) como un medio para encapsular el CO<sub>2</sub>, mediante un proceso acelerado de carbonatación y profundizar en el conocimiento acerca del comportamiento de los concretos con sustituciones de agregados natural por agregados reciclados de concreto carbonatado (ARCC) y su desempeño, mediante algunos ensayos de resistencia y durabilidad. Finalmente se pretende complementar los resultados obtenidos por autores como (Molano, Torres, & Molano, 2014), (Monje & Rodríguez, 2016) y (Muñoz, 2016), quienes iniciaron con esta línea de investigación en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Es de resaltar, que la fracción fina resultado de la trituración de cilindros utilizada por (Monje & Rodríguez, 2016), fue la que se utilizó como agregado fino reciclado (AFRC) en la elaboración de los concretos de este trabajo de investigación.

## Capítulo 3

### Objetivos

#### Objetivo general:

Evaluar algunas de las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos elaborados con agregados finos reciclados procedentes del concreto y sometidos a un proceso de carbonatación acelerada.

#### Objetivos específicos:

- Revisar la información existente relacionada con el uso de agregados reciclados sometidos a un proceso de carbonatación acelerada.
- Determinar la variación en densidad y absorción de los agregados finos reciclados de concreto (AFRC), luego de ser expuestos a un proceso de carbonatación acelerada.
- Determinar el efecto de la sustitución de agregados finos naturales (AFN) por agregados finos reciclados de concreto carbonatados (AFRCC) y sin carbonatar (AFRC), por medio de la elaboración de ensayos de resistencia y durabilidad sobre muestras de concreto, variando el porcentaje de sustitución de este material (0%, 20%,40%), con relación agua material cementante de 0.50.
- Comparar algunas de las propiedades mecánicas y de durabilidad de las muestras de concretos.
- Comparar los resultados obtenidos con estudios similares realizados en diferentes partes del mundo.

## Capítulo 4

### Programa experimental

#### 4.1 Metodología.

Para el desarrollo del proceso investigativo, se utilizó un método experimental con enfoque cuantitativo. El análisis documental y la comparación investigativa, fueron herramientas que facilitaron la ejecución de este proyecto. Se realizaron muestras con diferentes porcentajes de sustitución de agregados finos naturales (AFN) por agregados finos reciclados de concreto carbonatados (AFRCC) y no carbonatados (AFRC). El programa experimental se desarrolló en las siguientes etapas:

- ✓ Caracterización de los materiales.
- ✓ Elaboración de mezclas.
- ✓ Ensayos en el concreto.

#### 4.2 Caracterización de los Materiales.

A continuación, se describen y presentan algunas de las propiedades de los materiales que fueron utilizados para la elaboración de las muestras de concreto. Estos fueron suministrados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Adicionalmente se realizaron los ensayos de caracterización del material reciclado de concreto carbonatado y sin carbonatar.

##### 4.2.1 Cemento.

Se utilizó cemento ARGOS de uso general.

Tabla 1. Parámetros Químicos Especificados por Argos.

PARÁMETROS QUÍMICOS ESPECIFICACIONES ARGOS	
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6
Trióxido de azufre, SO, máximo (%)	3.5

Fuente: (ARGOS).

Tabla 2. Parámetros Físicos Especificados por Argos.

PARÁMETROS FÍSICOS ESPECIFICACIONES ARGOS	
Fraguado inicial, mínimo (minutos)	45
Fraguado final, máximo (minutos)	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8
Expansión en agua, máximo (%)	0.02
Resistencia a 3 días, mínimo (Mpa)	9
Resistencia a 7 días, mínimo (Mpa)	16
Resistencia a 28 días, mínimo (Mpa)	26
Blaine, mínimo (cm <sup>2</sup> /gr)	2800

Fuente: (ARGOS).

#### 4.2.2 Aditivos

Se utilizó EUCON 37, que es un aditivo reductor de agua y fluidificante de alto poder, con el fin de mejorar la manejabilidad del concreto. (TOXEMENT, 2016)

#### 4.2.3 Agregado grueso (AGN)

A continuación, se presenta la caracterización del agregado grueso natural.

##### PESO UNITARIO

Peso Unitario Suelto= 1270 kg/m<sup>3</sup>

Peso Unitario Compacto= 1470 kg/m<sup>3</sup>

##### DENSIDAD

Densidad Nominal= 2.66 g/cm<sup>3</sup>

Densidad Saturada y Seca= 2.70 g/cm<sup>3</sup>

Densidad Aparente= 2.77 g/cm<sup>3</sup>

Absorción= 1.5

Coefficiente de Forma= 0.25

Peso Material Sucio y Seco (g)= 9332

Peso material pasa N° 200 (g)= 52

Peso Material retenido Seco (g)=9280

Fuente: propia.

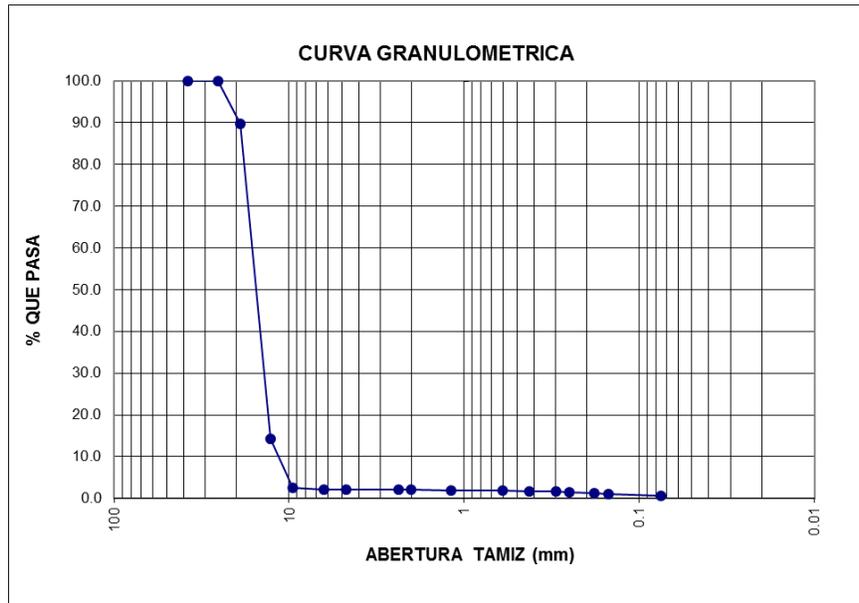


Figura 1. Curva granulométrica agregado grueso natural. Fuente: propia.

#### 4.2.4 Agregado fino natural (AFN)

A continuación, se presenta la caracterización del agregado fino natural.

##### PESO UNITARIO

Peso Unitario Suelto= 1580 kg/m<sup>3</sup>

Peso Unitario Compacto= 1700 kg/m<sup>3</sup>

##### DENSIDAD

Densidad Nominal= 2.5 g/cm<sup>3</sup>

Densidad Saturada y Seca= 2.56 g/cm<sup>3</sup>

Densidad Aparente= 2.65 g/cm<sup>3</sup>

Absorción= 2.10%

Módulo de Finura= 2.89

Peso Material Sucio y Seco (g)=2790

Peso material pasa N° 200 (g)=80

Peso Material retenido Seco (g)=2710

Fuente: propia.

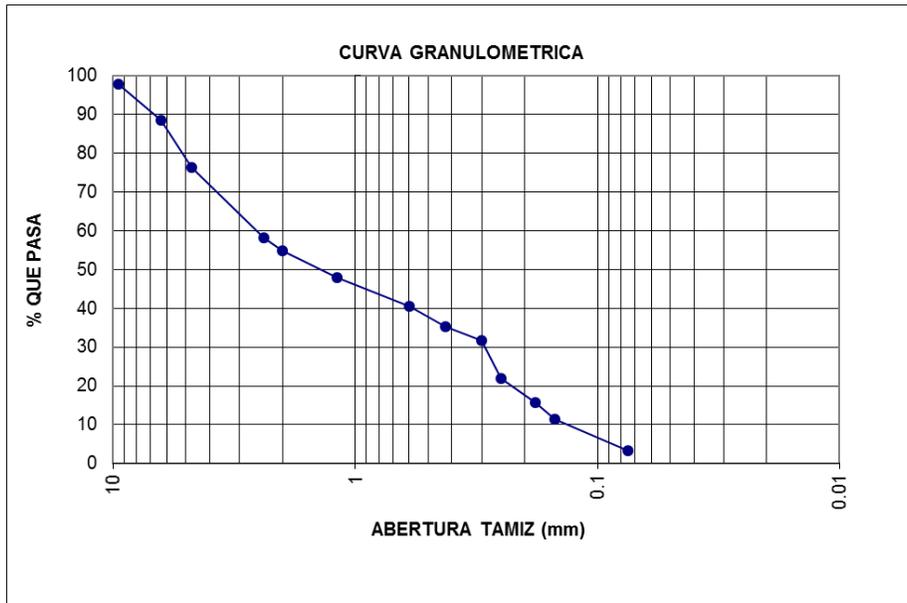


Figura 2. Curva granulométrica agregado fino natural. Fuente: propia.

#### 4.2.5 Agregado fino reciclado de concreto (AFRC)

El agregado fino reciclado de concreto (AFRC), fue obtenido de cilindros sobrantes de concreto de proyectos anteriores desarrollados por la ECI, los cuales no estaban clasificados. Fueron triturados y posteriormente pasados por una zaranda con abertura de 4mm con el fin de separarlo del agregado con tamaño superior.



Figura 3. Triturado de material. Fuente: propia.

Posteriormente se determinó la granulometría del material obtenido y se realizaron ensayos de densidad y absorción.

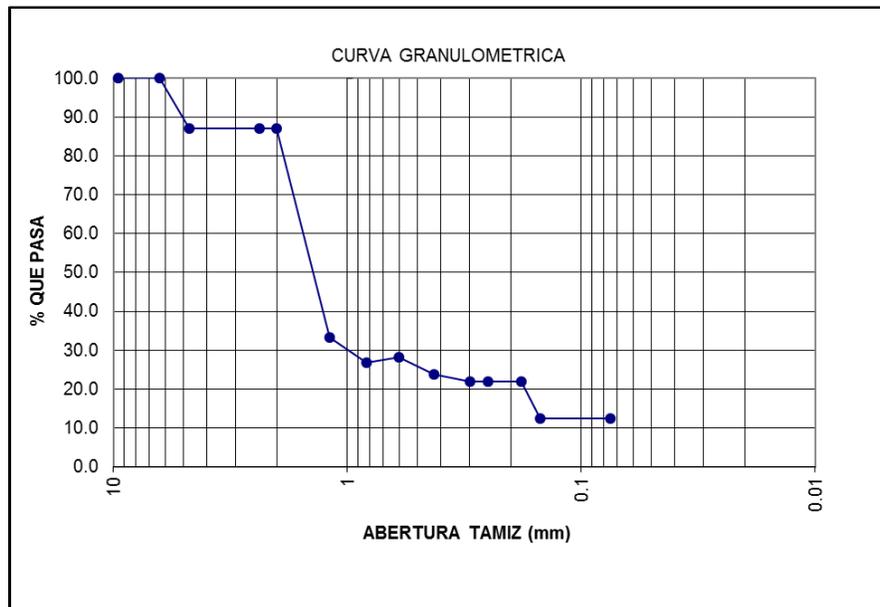


Figura 4. Curva granulométrica agregado fino natural. Fuente: Propia.

#### PESO UNITARIO

Peso Unitario Suelto= 1250 kg/m<sup>3</sup>

Peso Unitario Compacto= 1366 kg/m<sup>3</sup>

#### DENSIDAD

Densidad Nominal= 2.59 g/cm<sup>3</sup>

Densidad Aparente= 2.25 g/cm<sup>3</sup>

Absorción= 10.6%

Módulo de Finura= 3.49

#### 4.2.6 Agregado fino reciclado de concreto carbonatado (AFRCC)

El AFRC fue sometido a un proceso de carbonatación acelerada durante 7 días (Fröhlich, Hentges, & Kulakowski, 2014). El material fue colocado en bandejas y expuesto a un ambiente con una humedad del 65 %, temperatura de 23°C y una concentración de CO<sub>2</sub> del 10%, siendo removido constantemente, con el fin de garantizar la carbonatación de todo el agregado.



Figura 5. ARC en la cámara de carbonatación acelerada. Fuente: Propia.

Se aplicó una solución de fenolftaleína al 1%, con el fin de verificar la carbonatación del AFRC



Figura 6. ARC carbonatado (ARCC). Fuente: Propia.

Finalmente se realizaron ensayos de peso unitario, densidad y absorción, con el fin de comparar estos resultados con los del material reciclado sin carbonatar.

#### PESO UNITARIO

Peso Unitario Suelto= 1301 kg/m<sup>3</sup>

Peso Unitario Compacto=	1478	kg/m <sup>3</sup>
DENSIDAD		
Densidad Nominal=	2.61	g/cm <sup>3</sup>
Densidad Aparente=	2.46	g/cm <sup>3</sup>
Absorción=	6.38%	

### 4.3 Elaboración de mezclas.

Se realizaron 5 mezclas de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de material fino reciclado de concreto (AFRC) y agregado fino reciclado de concreto carbonatado (AFRCC) con una relación agua /cemento=0.50, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de sustitución de las muestras

Mezcla No.	AFN	AFNC	AFNCC
1	100%	0%	0%
2	80%	20%	0%
3	60%	40%	0%
4	80%	0%	20%
5	60%	0%	40%

Fuente: Propia

El diseño de las mezclas de efectuó a partir de algunos parámetros previamente definidos, siguiendo en general la metodología de ACI. Dichos parámetros se mencionan a continuación.

#### 4.3.1 Asentamiento y contenido de agua

Con el fin de garantizar una adecuada manejabilidad del concreto, se estableció el asentamiento en 7.5 cm y el contenido de agua en 200 kg/m<sup>3</sup> para un tamaño máximo del agregado grueso de ¾”.

### 4.3.2 Relación agua / cemento (a/c) y resistencia a la compresión esperada.

De acuerdo con la Figura 7 con una relación  $a/c = 0.5$ , se esperaba obtener una resistencia a la compresión del concreto de 28MPa. Este valor puede variar ya que estos valores corresponden a mezclas elaboradas con cemento tipo I (Sanchez, 2001).

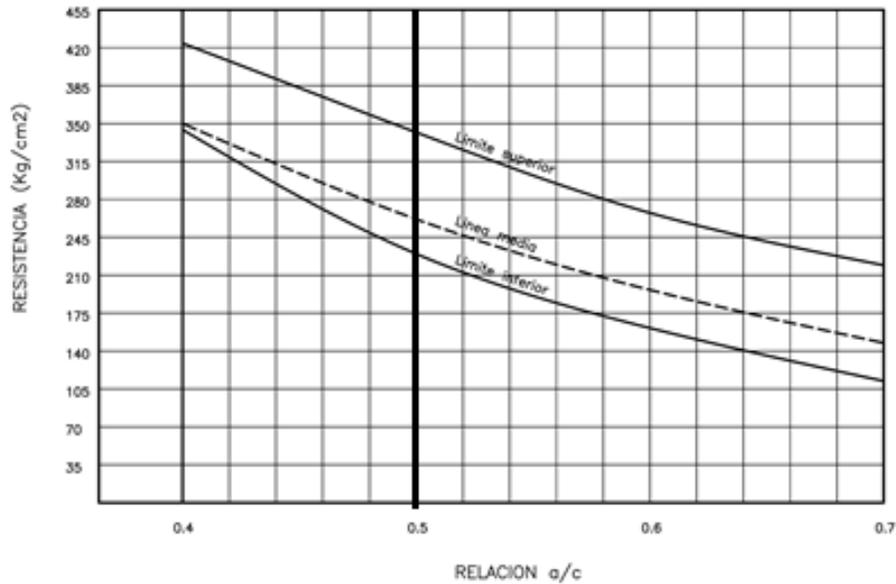


Figura 7. Correspondencia entre la resistencia a compresión y la relación  $a/c$  para los cementos colombianos, portland tipo I en concretos sin aire incluido. (Sanchez, 2001)

### 4.3.3 Optimización de la granulometría.

Luego de caracterizar los agregados se determinó el porcentaje adecuado de AGN y AFN a utilizar en la mezcla de referencia. Por lo general, la granulometría del agregado grueso y fino está por fuera de los parámetros establecidos para el diseño de mezclas de concreto, por lo que se hizo necesario realizar la optimización de la granulometría por el método gráfico de La Road Note Laboratory (RLN) Figura 8. La mezcla de referencia se diseñó con un contenido de arena del 55% del peso total de los agregados.

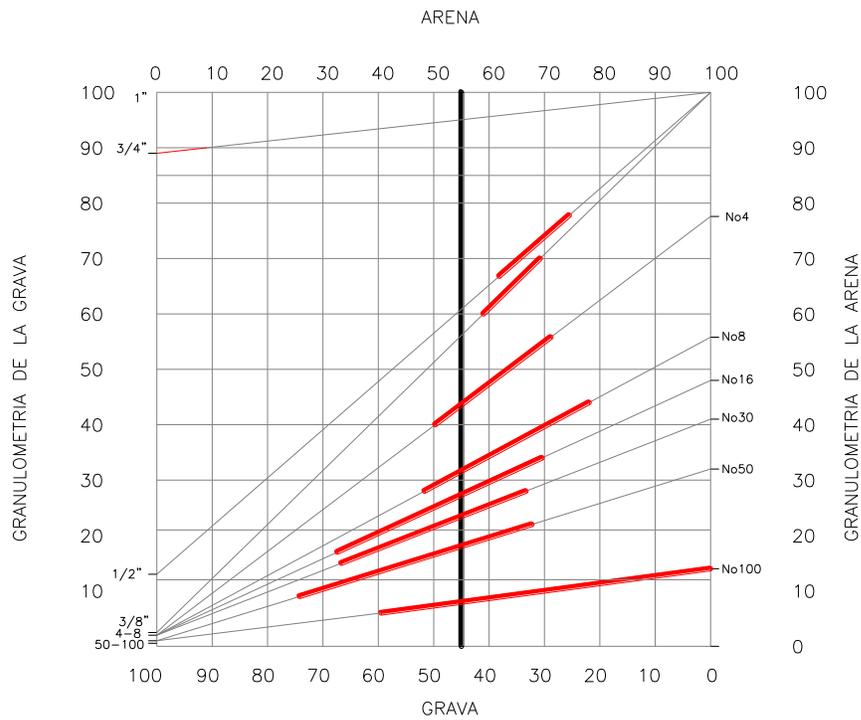


Figura 8. Optimización granulométrica. Fuente: Propia.

#### 4.3.4 Dosificación de las mezclas de concreto.

A partir de la caracterización de los materiales y los parámetros establecidos para este trabajo, se realizó la correspondiente dosificación de los componentes, con los diferentes porcentajes de sustitución de AFN y la respectiva corrección de pesos por humedad y absorción de los agregados.

En la Tabla 4 se encuentran las cantidades definitivas utilizadas en las diferentes mezclas con diferentes porcentajes de sustitución de AFN.

Tabla 4. Cantidades definitivas de material para las diferentes mezclas.

MATERIAL	MUESTRA No.				
	1 100% AN	2 80%AN-20%AFRC	3 60%AN-40%AFRC	4 80%AN-20%AFRC	5 60%AN-40%AFRC
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	200	200	200	200	200
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	400	400	400	400	400
Aditivo eucon 37 (kg/m <sup>3</sup> )	5	5	5	5	5
AGN (kg/m <sup>3</sup> )	971	969	947	950	949
Humedan AGN %	1.60%	1.80%	4.62%	4.20%	4.20%
<b>AGN Corregido (kg/m<sup>3</sup>)</b>	972	972	976	975	974
AFN (kg/m <sup>3</sup> )	795	634	465	622	466
Humedan AFN %	7.80%	10.80%	8.72%	9.29%	9.29%
<b>AFN Corregido (kg/m<sup>3</sup>)</b>	839	688	495	666	498
AFRC (kg/m <sup>3</sup> )		159	310		
Humedan AFRC %		10.30%	9.57%		
<b>AFRC Corregido (kg/m<sup>3</sup>)</b>		175	307		
AFRCC (kg/m <sup>3</sup> )				155	310
Humedan AFRCC %				5.38%	10.00%
<b>AFRCC Corregido (kg/m<sup>3</sup>)</b>				154	321
Agua Corregida (kg/m <sup>3</sup> )	155	143	143	132	131

Fuente: Propia.

#### 4.3.5 Elaboración y curado de probetas.

De acuerdo con las dosificaciones de la Tabla 4 se fundieron 51 cilindros de  $\varnothing=100$  mm y h=200 mm. Adicionalmente seis (6) viguetas de 50x50x285 mm para evaluar la variación volumétrica. Los agregados finos reciclados de concreto carbonatado (AFRCC) y sin carbonatar (AFRC) fueron saturados 24 horas antes de elaborar las mezclas.



Figura 9. Fundida de cilindros y viguetas de concreto. Fuente: Propia.

Los cilindros fueron desencofrados 24 horas después de fundidos y colocados en la piscina de curado del laboratorio de la Escuela. Las viguetas fueron curadas en una cámara con humedad relativa del 55% y temperatura controlada de 25°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ).



Figura 10. Curado de cilindros de concreto (Derecha Piscina, izquierda cámara de curado). Fuente: Propia.

#### 4.4 Ensayos en el concreto

En la Tabla 5 se listan los ensayos realizados sobre las diferentes muestras de concreto, con el fin de evaluar algunas de las propiedades mecánicas y de durabilidad de las diferentes mezclas. En general se ensayaron tres (3) probetas por tipo de ensayo a diferentes edades.

Tabla 5. Listado de ensayos.

<b>PROPIEDADES EN EL CONCRETO FRESCO</b>	Asentamiento
	Temperatura
	Masa unitaria
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO ENDURECIDO</b>	Resistencia a la compresión
	Módulo de elasticidad
	Resistencia a la tracción indirecta
<b>ENSAYOS DE DURABILIDAD EN EL CONCRETO ENDURECIDO</b>	ISAT (Tasa de absorción superficial inicial)
	Sortividad
	Velocidad de pulso ultrasónico
	Permeabilidad a los cloruros.
	Resistencia a los sulfatos

#### 4.4.1 Asentamiento, peso volumétrico y contenido de aire.

El ensayo de asentamiento, se realizó de acuerdo con la norma NTC 396 (ASTM C 143-90). La manejabilidad de la muestra suele depender de varios factores como la gradación del agregado fino, la gradación del agregado grueso, la forma y textura superficial de los agregados, cantidad relativa de pasta y agregados, fluidez de la pasta y el contenido de aire entre otros (Rivera, 2013).

Por otra parte, se determinó la cantidad de aire naturalmente atrapado en las mezclas de concreto de acuerdo con la norma NTC 1032 (ASTM C231/C231M:2010)), con el fin de compararlo con el estimado en el diseño de la mezcla. Para mezclas con tamaño máximo del agregado de  $\frac{3}{4}$ " se estima que el % promedio de aire naturalmente atrapado debe estar alrededor del 2%.



Figura 11. Ensayos de asentamiento, masa unitaria y contenido de aire. Fuente: Propia.

#### 4.4.2 Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros más representativos a la hora de determinar el desempeño de una muestra de concreto. Los resultados del ensayo permiten apreciar la ganancia de resistencia a la compresión de los especímenes en función del tiempo y validar algunos de los parámetros tenidos en cuenta a la hora de diseñar una mezcla de concreto. Se ensayaron 3 probetas de cada una de las mezclas de concreto a los 7, 28, 90, 180 y 360 días de edad de acuerdo con la norma ASTM C39.



Figura 12. Ensayos de compresión. Fuente: Propia.

#### 4.4.3 Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad es uno de los factores que determinan el concreto a utilizar en las etapas de diseño de estructuras y está relacionado con la resistencia a la compresión. Este ensayo se realizó a los 28, 90 y 180 días de edad de las muestras de concreto. Este ensayo se realizó sobre las muestras curadas en agua y las sometidas a la acción de sulfato de magnesio.



Figura 13. Izquierda-Ensayo módulo de elasticidad. Derecha-Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Fuente: Propia.

#### 4.4.4 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico de acuerdo con ASTM C597-09 sobre 3 cilindros de concreto.

#### 4.4.5 Resistencia a la tracción indirecta (ftc)

El ensayo de tracción indirecta se realizó sobre tres (3) muestras de concreto para diferentes edades (28, 90, 180 y 360 días).

La resistencia a la tracción indirecta se determinó cargando a compresión el cilindro a lo largo de dos líneas axiales diametrales opuestas de acuerdo con la norma ASTM C496-04 (ver Figura 14). La resistencia a la tensión indirecta se calculó con la siguiente ecuación

$$f_{tc} = \frac{2P}{\pi * L * d} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde:

$f_{tc}$  = resistencia a la tracción indirecta, MPa

P = máxima carga aplicada por la máquina de ensayo, N

l = longitud, mm

d = Diámetro, mm



Figura 14. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ftc). Fuente: Propia.

#### 4.4.6 Prueba rápida de permeabilidad de cloruros

Este ensayo permite monitorear la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de una muestra de concreto de 50 mm de espesor y de 100 mm de diámetro, durante un periodo de tiempo de 6 horas. Las rebanadas de concreto se sellaron perimetralmente con resina epóxica, y se realizó el correspondiente montaje de la muestra en medio de dos capsulas manteniendo un diferencial de 60 V entre las dos caras. En una de las capsulas se colocó cloruro de sodio al 3% y en el otro extremo una solución de hidróxido de sodio de 0.3N en agua destilada. La carga total registrada en coulombs al final de las 6 horas de ensayo, se relaciona con la resistencia de la muestra a la penetración del ion cloruro (ASTM-C1202-2).

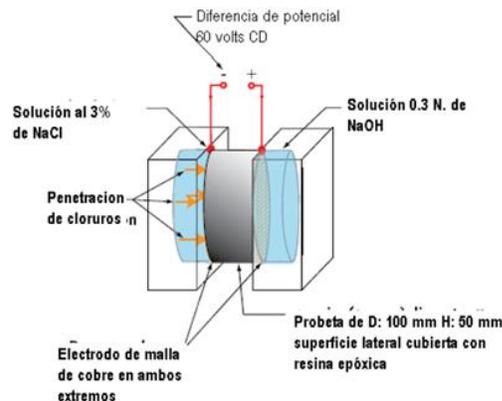


Figura 15. Montaje tipo prueba rápida de permeabilidad de cloruros Gómez (citado por (Bojacá, 2013)).

#### 4.4.7 Tasa de absorción superficial inicial ISAT

Este ensayo se realizó sobre tres cilindros de concreto para diferentes edades (28, 90, 180 días) de acuerdo con la Norma Británica BS 1881-part 208: 1996. Al conocer la cantidad de agua absorbida por unidad de tiempo se puede calcular el coeficiente de permeabilidad al agua de los concretos (BS-1881-part-208, 1996).



Figura 16. Montaje ISAT. Fuente: Propia.

#### 4.4.8 Sortividad

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM C1585 – 13 sobre tres rodajas de concreto de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura para diferentes edades (28, 90, 180 días). Este ensayo consiste en determinar la velocidad de absorción de agua por capilaridad en un concreto, midiendo el incremento de masa en un periodo de tiempo, estando en contacto con el agua por una cara. La tasa de absorción se mide como el cambio de masa a diferentes intervalos de tiempo (ASTM-C1585-13, 2013).



Figura 17. Montaje ensayo sortividad. Fuente: Propia

#### 4.4.9 Resistencia a sulfatos

Con el fin de determinar el desempeño de las mezclas de concreto al someterlas al ataque de sulfatos, se realizó la inmersión de 9 cilindros y 3 viguetas de concreto en una solución de sulfato de magnesio. Dicha solución tenía un contenido de 50 gr de sulfato de magnesio por cada 900 ml de agua de acuerdo con (ASTM-C1012, 2004). Estos especímenes se almacenaron durante 28 días en la piscina de curado y posteriormente se sumergieron en la solución. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasónico a los 28, 90 y 180 días de exposición. Las viguetas se almacenaron en la cámara de curado y posteriormente se sumergieron en la solución de acuerdo con (ASTM-C1012, 2004). Se realizaron mediciones semanales de la variación de longitud de las viguetas, con el fin de determinar la expansión o contracción de las mismas. Los resultados se compararon con los especímenes curados en agua.



Figura 18. Muestras de concreto sumergidas en una solución de sulfato de magnesio. Fuente: Propia.

#### 4.4.10 Cambio volumétrico del concreto

Se fundieron 6 viguetas por cada mezcla de concreto las cuales fueron colocadas en una cámara de curado con humedad y temperatura controlada. Tres de las viguetas fueron sumergidas en una solución de sulfato de magnesio a los tres días de fundidas. Se realizaron medidas a diferentes edades, con el fin de determinar los cambios volumétricos del concreto con parámetros de humedad y temperatura controlada y a la acción de los sulfatos.



Figura 19. Viguetas en cámara de curado y sumergidas en una solución de sulfato de magnesio.  
Fuente: Propia.

## Capítulo 5

### Resultados y Discusión de Resultados

#### 5.1 Tratamiento a los Agregados.

A continuación se presentan la comparación de los resultados de peso unitario densidad y absorción de los agregados reciclados carbonatados (AFRCC) y sin carbonatar (AFRC)

Tabla 6. Peso unitario, densidad y absorción de los AFR

	AFRC	%	AFRCC	%
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1250	100%	1301	104%
Peso Unitario Compacto	1366	100%	1478	108%
Densidad Nominal	2.59	100%	2.61	101%
Densidad Aparente	2.25	100%	2.46	109%
Absorción (%)	10.6%	100%	6.4%	60%

Fuente: Propia

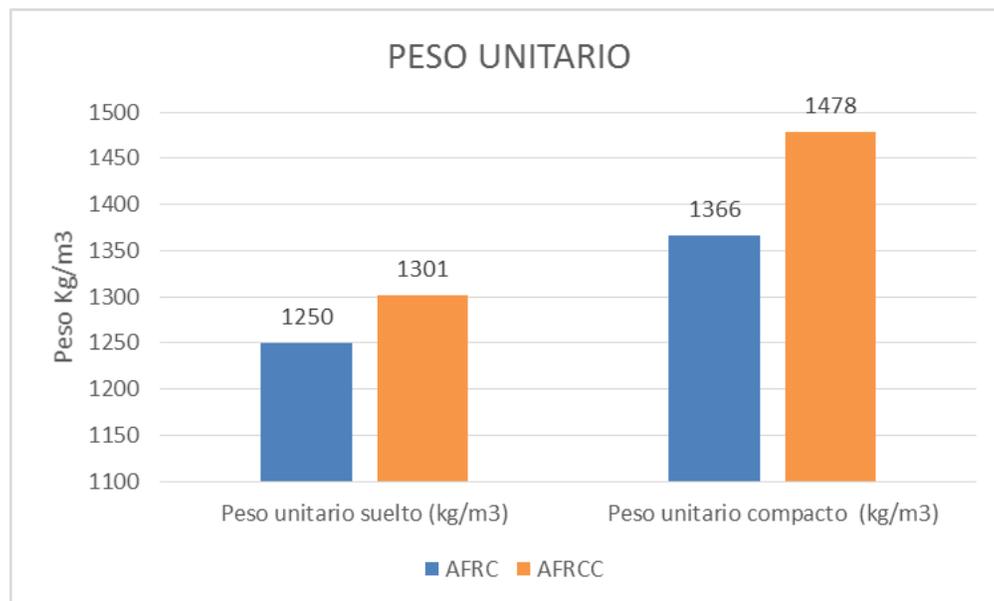


Figura 20. Peso unitario AFRC y AFRCC. Fuente: Propia.

En la Tabla 6 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia como el AFRC que fue sometido al proceso de carbonatación disminuyó su absorción un 40%, aumento su peso unitario suelto en aproximadamente un 4% y su densidad aparente en un 9%. Estos resultados coinciden en términos generales con lo encontrado por (Fröhlich, Hentges, & Kulakowski, 2014), (Molano, Torres, & Molano, 2014), (Monje & Rodríguez, 2016) y (Muñoz, 2016) sobre el aumento de la densidad y disminución en el % de absorción de los ARC, luego de ser sometidos al proceso de carbonatación acelerada debido a la fijación del CO<sub>2</sub>. En los estudios realizados con agregado fino reciclado como el de (Molano, Torres, & Molano, 2014), los resultados son similares. Sin embargo (Monje & Rodríguez, 2016) no obtuvieron disminuciones en la absorción de los AGRC tan significativas, ya que las partículas de arena tienen una mayor superficie específica en comparación con el agregado grueso.

## 5.2 Asentamiento, peso volumétrico y contenido de aire.

En la Tabla 7 y Figura 20, se muestran los resultados del ensayo de asentamiento, contenido de aire y peso volumétrico realizado a las mezclas en estado fresco.

Tabla 7. Resultados de asentamiento, masa unitaria y contenido de aire.

Tipo de Ensayo	Mezcla No.				
	1	2	3	4	5
Asentamiento (cm)	8.50	7.80	9.00	8.50	10.16
Masa unitaria g/cm <sup>3</sup>	2.23	2.22	2.18	2.23	2.25
Contenido de aire %	2.20	2.25	2.30	2.20	2.15

Fuente: Propia.

El asentamiento se mantuvo cercano a las 7.5 cm a excepción de la muestra No 5 (60% AFN -40% AFRCC) en donde llegó a las 4". Esta mezcla se tornó de un color negro oscuro y daba la sensación de un exceso de agregado grueso. Se aprecia que en los concretos con sustitución del AFN por AFRC la masa del concreto en estado fresco disminuye mientras que en los concretos con AFRCC la masa es más alta que la muestra de referencia. Esto se debe a la menor densidad del AFRC y a la mayor densidad del AFRCC.

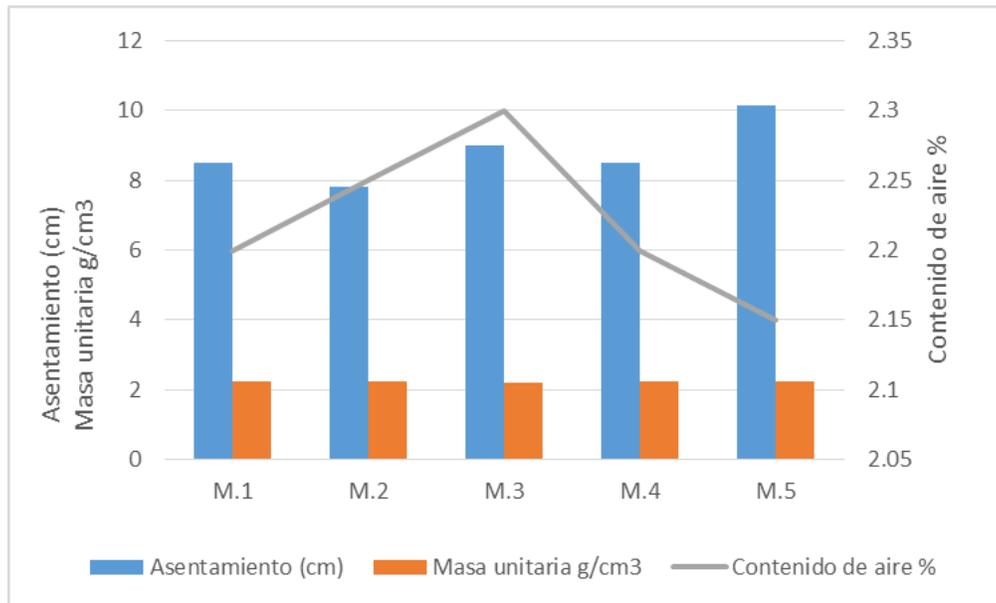


Figura 21. Asentamiento, masa unitaria y contenido de aire. Fuente: Propia.

### 5.3 Resistencia a la compresión.

En la Tabla 8 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las 5 mezclas a diferentes edades. Se aprecia que la muestra No. 2 obtuvo la mayor resistencia a los 360 días de edad. Esta mezcla tiene un % de sustitución de AFN por AFRC del 20%. Sin embargo, las muestras elaboradas con agregados reciclados carbonatados (Muestra 4 y 5) tuvieron un mejor desempeño a los 28 días de edad. En la Figura 22 se observa como las muestras elaboradas con AFRC obtienen resistencias mayores a edades tempranas (7 y 28 días), pero a medida que aumenta el tiempo las muestras con AFN y AFRC adquieren mayor resistencia.

Tabla 8. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

EDAD (días)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9.2	11.1	9.8	20.8	19.0
28	22.0	24.1	22.4	25.9	29.1
90	35.1	37.0	34.2	28.9	34.3
180	36.7	41.2	35.0	28.6	34.3
360	37.8	43.0	37.0	31.5	34.6

Fuente: Propia

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos expresados en porcentaje, respecto a la muestra control. Se ve claramente como las muestras de concreto elaboradas con AFRCC obtuvieron valores superiores a los obtenidos por la muestra de control y los concretos elaborados con AFRC a los 7 y 28 días de edad.

Tabla 9. Resistencia a la compresión relativa respecto a la muestra patrón.

EDAD (días)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7	1.00	1.20	1.07	2.26	2.06
28	1.00	1.10	1.02	1.18	1.32
90	1.00	1.05	0.97	0.82	0.98
180	1.00	1.12	0.95	0.78	0.93
360	1.00	1.14	0.98	0.83	0.92

Fuente: Propia.

Luego de los 28 días la ganancia de resistencia de los concretos con AFRCC es muy pequeña (Ver Figura 22 y Figura 23) en comparación con los otros concretos; lo que hace pensar que la velocidad de hidratación de estos concretos es más alta que en los concretos con AFN y los concretos con AFRC. Por otra parte la ganancia de resistencia de las mezclas 1, 2 y 3 puede deberse a la saturación del agregado fino y a la mayor porosidad del mismo, constituyéndose esta en una fuente de agua durante el curado interno del concreto (Rodríguez, 2016).

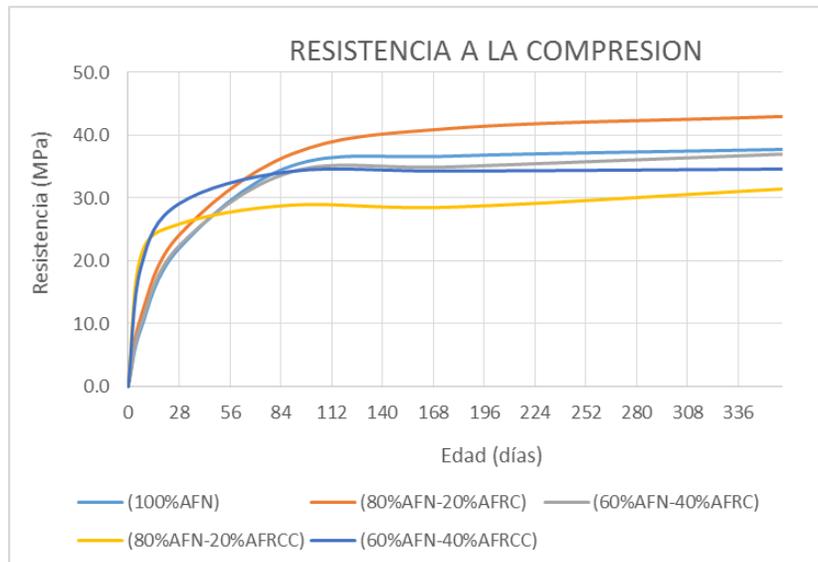


Figura 22. Curva de resistencia a la compresión muestras de concreto. Fuente: Propia.

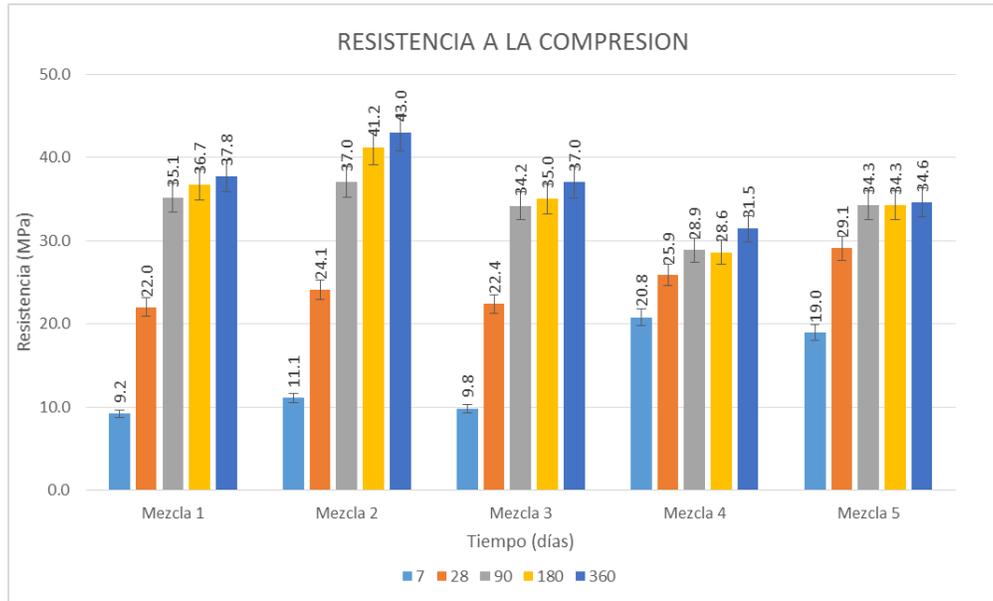


Figura 23. Resistencia a la compresión de muestras de concreto. Fuente: Propia.

(Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014) registro disminuciones respecto a la muestra de control entre el 1% y 5% en la resistencia a la compresión medida a los 90 días de edad de los concretos con AFRCC, valores que son muy similares a los obtenidos para la mezcla con 50% de AFRCC ensayados a los 90 días de edad.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 24 se muestra como el concreto elaborado con AFRCC (muestra 4 y 5) obtuvo resistencias superiores a la compresión a los 7 y 28 días, respecto al concreto de referencia (muestra No. 1).

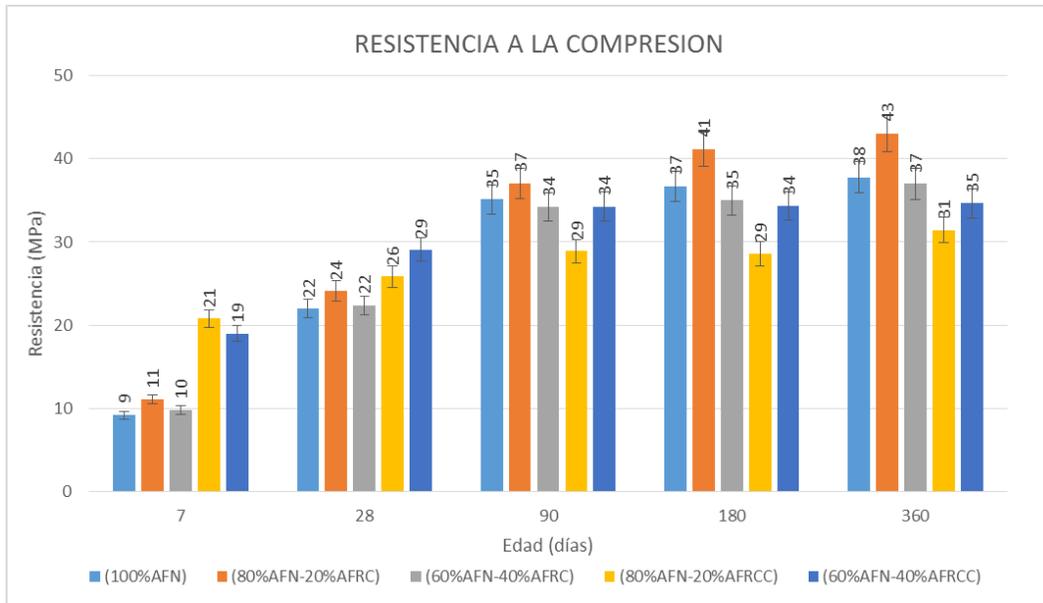


Figura 24. Resistencia a la compresión de muestras de concreto a diferentes edades. Fuente: Propia.

En cuanto a las mezclas con AFRC (Muestra 2 y 3) se pudo apreciar que el comportamiento es muy similar a la muestra patrón, superando incluso la resistencia obtenida a los 28 días en un 10%. Este comportamiento difiere de los resultados obtenidos por (Bojacá, 2013) y por (Laverde, 2014), quienes no obtuvieron un mejor comportamiento con las sustituciones de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado de concreto con una relación a/c igual ( $a/c=0.50$ ).

#### 5.4 Módulo de elasticidad.

De forma similar a la resistencia a compresión, la muestra con un 40% de ARCC obtuvo el mejor desempeño a los 28 días, superando en un 38% el valor obtenido por la muestra de control (ver Figura 25). Al comparar las muestras con 20% de sustitución de AFN (Mezclas 2 y 4), se evidencia un mejor comportamiento de la mezcla con agregado fino sin carbonatar. Este es un comportamiento contrario a lo obtenido en las muestras con un 40% de sustitución de AFN (Mezcla 3 y 5), en donde la mezcla elaborada con AFRCC obtuvo el módulo de elasticidad mayor. Sin embargo a los 180 días de edad, todos los concretos registraron valores

similares del módulo de elasticidad con variaciones entre el 5% y 7% respecto de la muestra de control como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

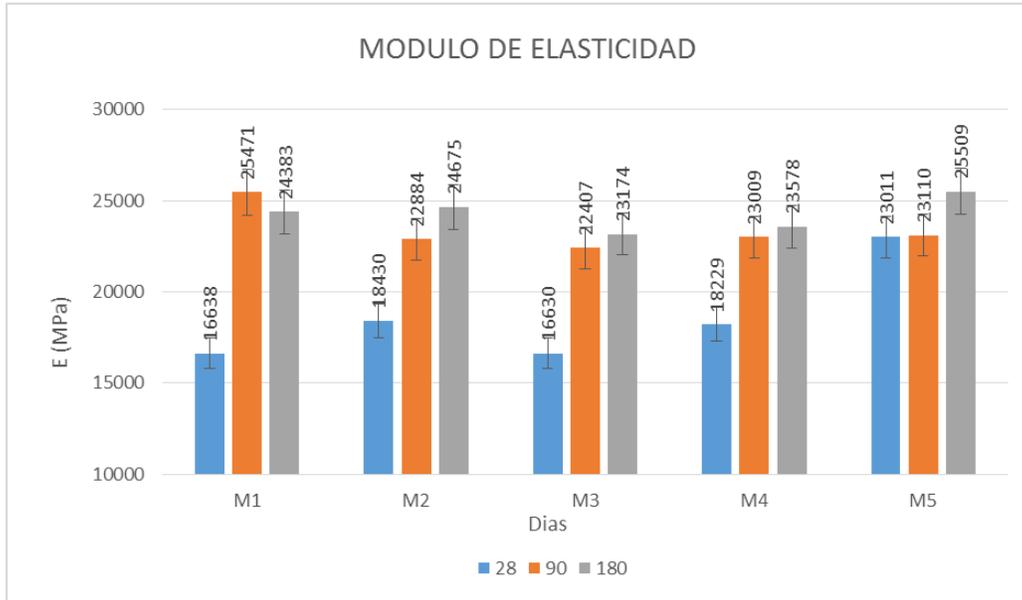


Figura 25. Resultados módulo de elasticidad. Fuente: Propia.

Tabla 10. Módulo de elasticidad Relativo respecto a la muestra patrón.

EDAD (días)	Modulo de elasticidad (MPa)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
28	1.00	1.11	1.00	1.10	1.38
90	1.00	0.90	0.88	0.90	0.91
180	1.00	1.01	0.95	0.97	1.05

La (NSR-10) en el capítulo C numeral C.8.5, indica que el módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ) puede tomarse como  $4700 \sqrt{f'c}$ , para concretos de densidad normal. Debido a que el módulo de elasticidad del concreto es sensible al módulo de elasticidad del agregado y puede diferir del valor especificado, la (NSR-10) presenta un valor medio sin distinguir el tipo de agregado igual a  $3900\sqrt{f'c}$  que corresponde a la media de la información nacional disponible. En la Tabla 11 se muestra el cálculo de la relación  $E_c/\sqrt{f'c}$  en donde se aprecia que a los 90 y 180 días la relación se encuentra en valores cercanos a 4000.

Tabla 11. Relación  $E_c / \sqrt{f'c}$

EDAD (días)	Relación R ( $E/\sqrt{fc}$ )				
	R1	R2	R3	R4	R5
28	3547	3753	3515	3584	4265
90	4297	3761	3832	4281	3948
180	4024	3846	3917	4410	4356

(Shi-Cong, Bao-jian, & Chi-Sun, 2014) reportó valores un 3% superiores para la muestra control a los 28 días y un 2% superiores a los 90 días, respecto a la muestra con AFRCC, lo cual es similar a los resultados de esta investigación, ya que las muestras con AFRCC reportaron valores similares a la muestra control a los 90 y 180 días de edad.

Por otra parte (Bojacá, 2013) reportó relaciones  $E_c / \sqrt{f'c}$  a los 28 días similares a las encontradas para las muestras 1, 2 y 3, que son las mezcla patrón y las elaboradas con AFRC sin carbonatar con una relación  $a/c=0.5$ .

## 5.5 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ensayo de VPU sobre las muestras de concreto (Ver Tabla 12)

Tabla 12. Resultados VPU (m/s).

EDAD (días)	Velocidad de pulso ultrasonico (m/s)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
28	3556	2414	3421	3576	2371
90	2273	2251	2250	2186	3953
180	1979	2253	2192	2137	3760
360<	1816	2034	2518	1959	1866

A los 28 días se registraron VPU similares en la mezcla 1, 2 y 3. A los 90 días se estabilizaron las velocidades para las mezclas 1, 2, 3 y 4 y la muestra No.5 reportó velocidades más altas. Este mismo resultado se obtuvo a 180 días en donde la VPU obtenida en la mezcla 5 (60%AFN-40%AFRCC) fue superior. En la Figura 26 se aprecia como la velocidad disminuye a medida que aumenta la edad.

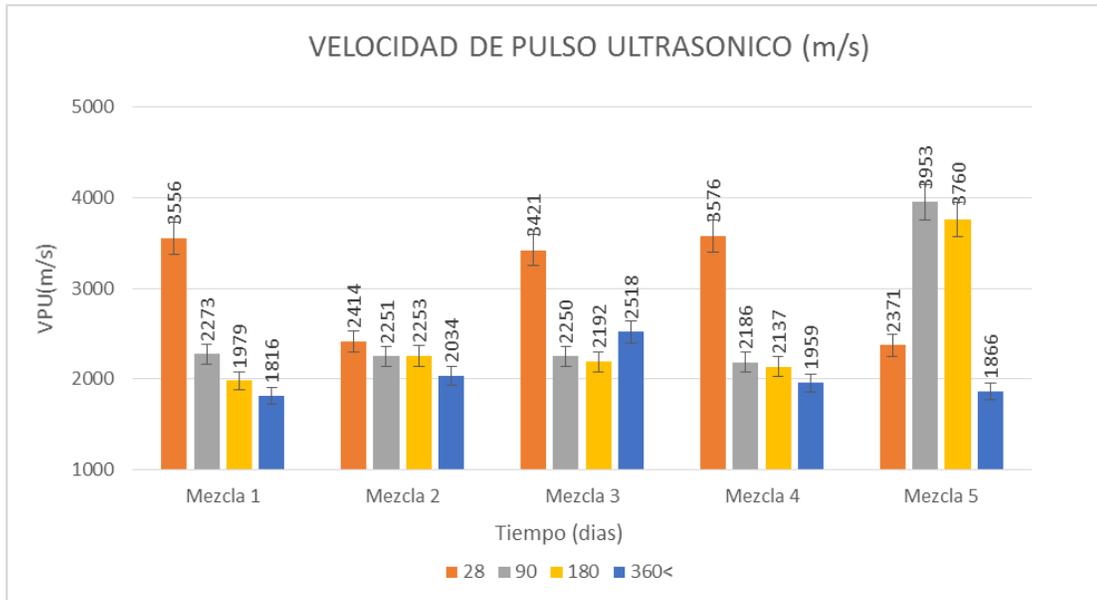


Figura 26. Resultados VPU. Fuente: Propia.

## 5.6 Resistencia a la tracción indirecta (ftc)

En la Tabla 13 se aprecian los resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las muestras de concreto.

Tabla 13. Resultados a la tracción indirecta (MPa)

EDAD (días)	Resistencia a la Tracción Indirecta (MPa)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
28	2.2	2.6	2.4	2.7	2.6
90	3.1	3.7	3.3	3.2	2.9
180	3.2	3.4	2.8	2.6	3.4
360	2.9	3.4	3.4	2.7	3.2

A los 28 días, todas las muestras obtuvieron valores superiores a la muestra de control. Luego de los 28 días las muestras con agregados reciclados reportaron valores superiores a la

muestra de control a excepción de la muestra con 20% de AFRCC, que obtuvo valores inferiores a los 180 y 360 días.

En la Tabla 14 se muestra que la resistencia a la tracción en la mezcla 2, 3 y 5 terminaron entre un 10% y un 20% por encima de la muestra de control y la muestra 4, término un 10% por debajo respecto a la muestra de control.

Tabla 14. Resultados a la tracción indirecta relativa.

EDAD (días)	Resistencia a la Tracción Indirecta (MPa)				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
28	1.00	1.16	1.10	1.22	1.17
90	1.00	1.20	1.07	1.05	0.96
180	1.00	1.09	0.89	0.83	1.08
360	1.00	1.17	1.17	0.93	1.10

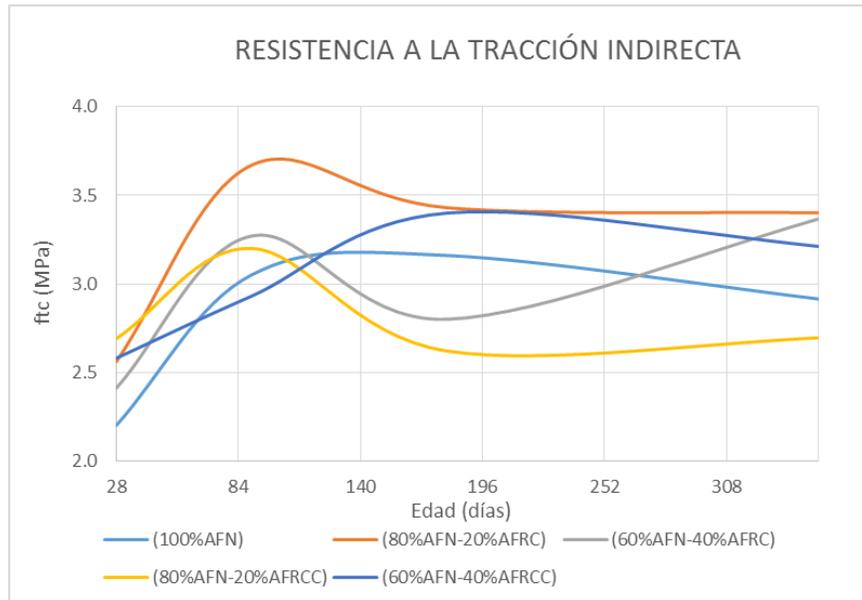


Figura 27. Resultados resistencia a la tracción indirecta. Fuente: Propia.

En la Tabla 15 se calcula el coeficiente de correlación  $K_{(f_{tc})}$  en función de la resistencia a la compresión y los resultados de laboratorio, en donde  $f_{tc}=K(f'c)^{2/3}$ . Al despejar K los valores se acercan a la expresión de Adam M. Neville citado por (Camposano, 2012) con  $K=0.30$ .

Tabla 15. Relación Kft

Resistencia a la Tracción Indirecta $f_{tc}$ (MPa)										
EDAD (días)	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3		Mezcla 4		Mezcla 5	
	$f_{tc}$ (Lab)	K								
28	2.2	0.28	2.6	0.31	2.4	0.30	2.7	0.31	2.6	0.27
90	3.1	0.28	3.7	0.33	3.3	0.31	3.2	0.34	2.9	0.28
180	3.2	0.29	3.4	0.29	2.8	0.26	2.6	0.28	3.4	0.32
360	2.9	0.26	3.4	0.28	3.4	0.31	2.7	0.27	3.2	0.30

## 5.7 Prueba rápida de permeabilidad de cloruros (RCPT)

En la Tabla 16 se muestran los valores de carga transmitida reportada durante la realización de la RCPT.

Tabla 16. Carga transmitida en la prueba RCPT

EDAD	Carga transmitida (Coloumbs)				
	M1	M2	M3	M4	M5
28	3369	3663	3862	6017	6361
90	1014	1497	1533	5126	5407
180	873	1071	1222	4699	4875

A los 28 días de edad las muestras elaboradas con AFN y AFRC presentan una permeabilidad moderada, mientras que las mezclas con AFRCC presentan una permeabilidad alta de acuerdo con lo establecido en el (ASTM-C1202-2, 2012).

Tabla 17. Permeabilidad al ion cloruro basado en la carga transmitida

Carga transmitida (Coloumbs)	Penetración del ión cloruro
>4.000	Alto
2.000 – 4.000	Moderado
1.000 – 2.000	Bajo
100 – 1.000	Muy bajo
<100	Insignificante

En la Figura 28 se aprecia que los resultados a los 28 días para las tres primeras mezclas, que están elaboradas con AFN y AFRC aumentan su resistencia al paso de los iones cloruro a los 90 días de edad, mientras que las mezclas con AFRCC mantienen valores similares a los obtenidos a los 28 días. Esta misma tendencia se observa a los 180 días. Con la anterior información se puede concluir que la resistencia al paso de los iones cloruro no aumenta significativamente con el paso de los días en las mezclas de concreto con AFRCC.

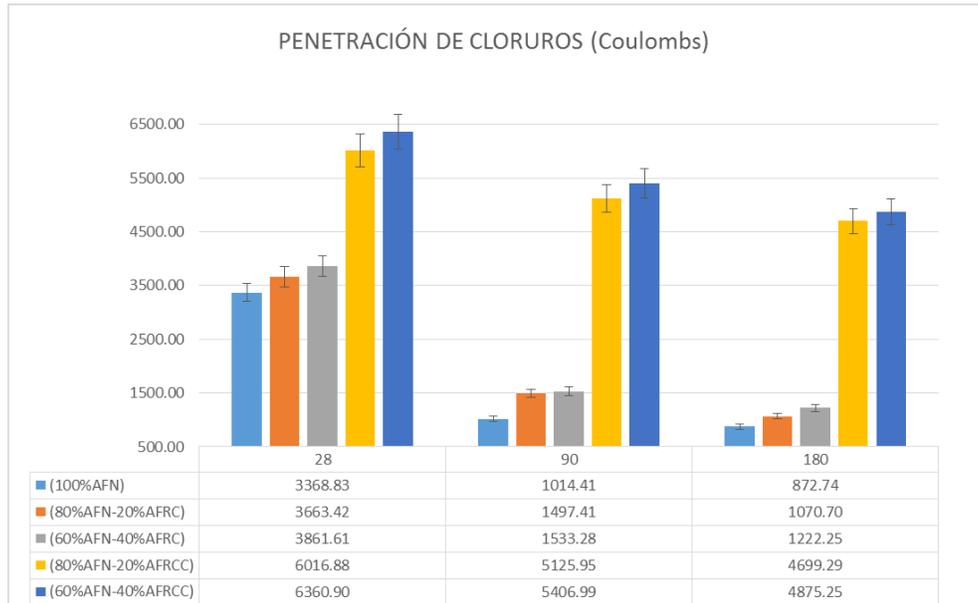


Figura 28. Resultados penetración de cloruros a los 28 días. Fuente: Propia.

De acuerdo con (Martinez, Flores, Uribe, & Medina, 2003), la resistencia a la compresión y la permeabilidad son inversamente proporcionales, sin embargo, esta relación no se cumple a los

28 días en las muestras con AFRCC, ya que a pesar de obtener resistencias a la compresión superiores a las de la muestra 1, 2 y 3, no tienen una permeabilidad más baja que estas.

## 5.8 Tasa de absorción superficial inicial ISAT

En la Tabla 18 se encuentran los resultados del ensayo de tasa de absorción superficial (ISAT) a los 28, 90 y 180 días.

Tabla 18. Tasa de absorción superficial.

Mezcla	28 días			90 días			180 días		
	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min
M1	0.094	0.062	0.044	0.075	0.050	0.030	0.042	0.043	0.033
M2	0.148	0.098	0.077	0.097	0.064	0.045	0.067	0.042	0.029
M3	0.206	0.134	0.102	0.101	0.063	0.043	0.071	0.040	0.026
M4	0.082	0.059	0.047	0.080	0.051	0.034	0.101	0.060	0.043
M5	0.131	0.093	0.073	0.104	0.069	0.049	0.113	0.077	0.054

En la Figura 29 se evidenció una menor tasa de absorción superficial inicial a 10 minutos a los 28 días de edad en las muestras de concreto con AFRCC (M4 y M5) respecto a las muestras con AFRC (M2 y M3). Esto podría deberse a la inclusión de los cristales de carbonato de calcio en la estructura de poros del agregado fino reciclado carbonatado (AFRCC), que hacen que este se densifique y disminuya el porcentaje de absorción. Sin embargo, a los 90 días de edad, las mezclas 1, 2 y 3 redujeron la tasa de absorción a los 10 minutos en 20%, 35% y 50% respectivamente, mientras que las mezclas con AFRCC obtuvieron resultados similares a los obtenidos a los 28 días. Esto podría deberse a la hidratación de la pasta y los productos químicos que en esta etapa se liberan.

A los 180 días las mezclas 1, 2 y 3 continuaron disminuyendo la tasa de absorción y los concretos con adiciones de AFRCC mantuvieron la tasa de absorción obtenida a los 28 días (ver Figura 29). Este comportamiento es igual al obtenido en el ensayo de resistencia a la compresión, en donde luego de los 28 días la ganancia de resistencia fue mínima. El concreto con mayor reducción en la tasa de absorción entre los 28 y 180 días fue la mezcla 3, con un 65% seguido por la muestra de control con una reducción del 55%.

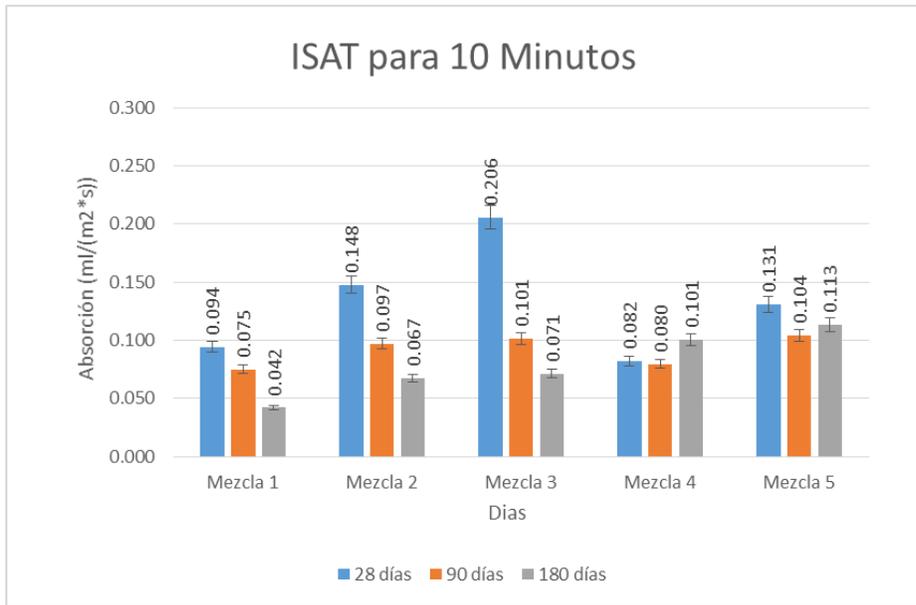


Figura 29. Tasa de absorción superficial inicial a 10 min. Fuente: Propia.

En la tasa de absorción a los 20 minutos (Figura 30) se presenta un comportamiento similar a la tasa obtenida a los 10 minutos, en donde la mezcla con 40% de AFRC obtuvo el mejor desempeño a los 180 días, al tener la tasa de absorción más baja. La reducción en la tasa de absorción a los 20 minutos se debe a la saturación de la superficie del concreto.

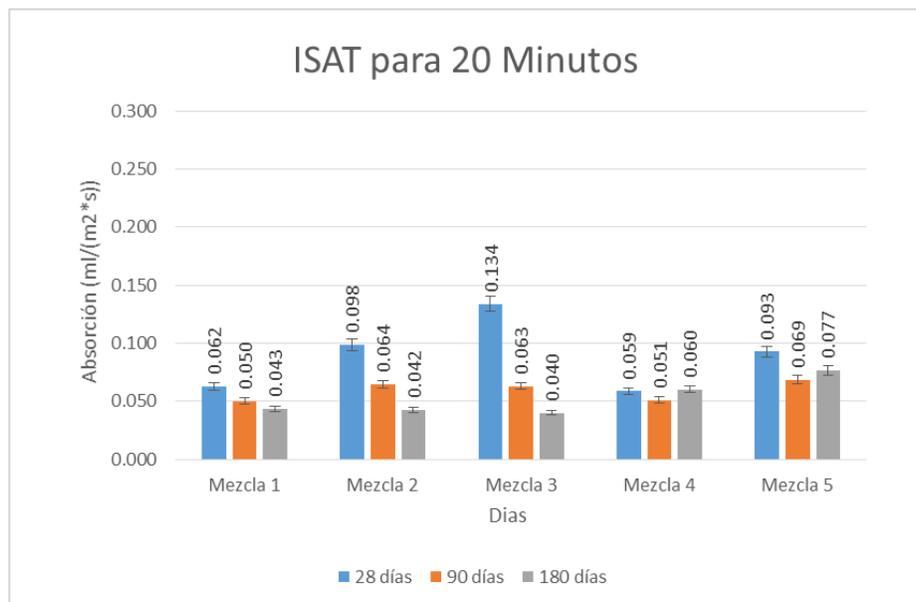


Figura 30. Tasa de absorción superficial inicial a 20 min. Fuente: Propia.

En la Figura 31 se aprecia un comportamiento similar al obtenido para la prueba a los 20 minutos. En general la muestra que obtuvo mejores resultados en condiciones controladas de curado a los 180 días de edad fue la mezcla No. 3, la cual fue elaborada con una sustitución de AFN del 40% por AFRC. A los 28 días de edad, esta mezcla obtuvo valores superiores de absorción en comparación a las otras mezclas, sin embargo, la reducción de la tasa a los 180 días fue considerable.

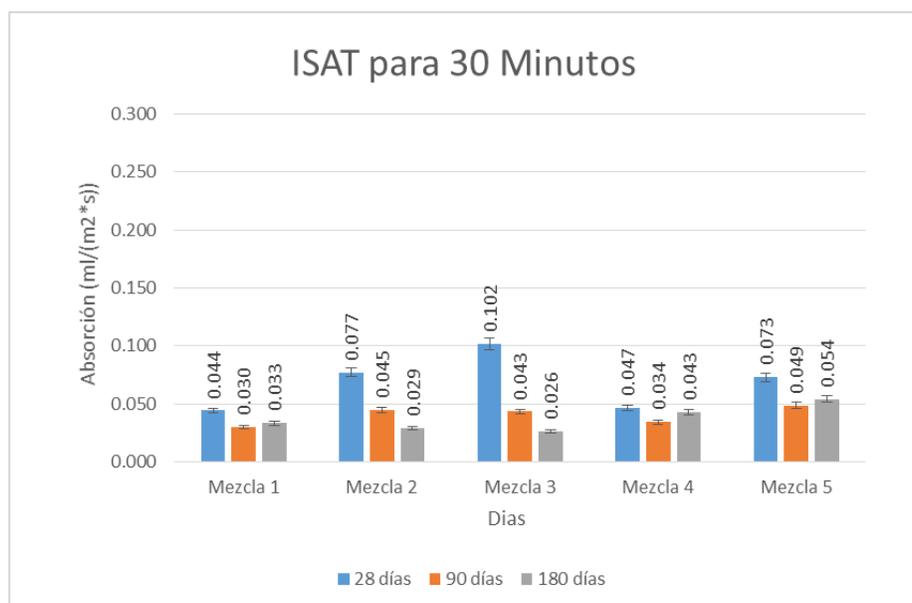


Figura 31. Tasa de absorción superficial inicial a 30 min. Fuente: Propia.

En la Tabla 19 se aprecia como la muestra No 4 es la que tienen un mejor desempeño en el ensayo de absorción superficial a los 28 días, alcanzando valores inferiores a los de la muestra patrón a los 10 y 20 min y ligeramente superiores a los 30 min.

Tabla 19. Tasa de absorción superficial a los 28 días.

Mezcla	28 días	28 días	28 días
	10 min	20 min	30 min
Mezcla 1	1.00	1.00	1.00
Mezcla 2	1.57	1.58	1.74
Mezcla 3	2.18	2.15	2.31
Mezcla 4	0.87	0.94	1.06
Mezcla 5	1.39	1.49	1.65

A los 180 días (ver Tabla 20) la que obtiene el mejor desempeño es la muestra patrón, ya que es la que obtiene la tasa de absorción más baja a los 10 min. La disminución en la tasa de absorción en las muestras 2 y 3 a los 20 y 30 min, podrían indicar que se saturan más rápidamente.

Tabla 20. Tasa de absorción superficial a los 180 días.

Mezcla	180 días	180 días	180 días
	10 min	20 min	30 min
Mezcla 1	1.00	1.00	1.00
Mezcla 2	1.59	0.98	0.87
Mezcla 3	1.69	0.92	0.78
Mezcla 4	2.39	1.39	1.29
Mezcla 5	2.69	1.76	1.62

## 5.9 Sortividad

A los 28 días de edad, la mezcla No 3 con un % de sustitución de AFN del 40% por AFRC obtuvo la mayor tasa inicial de absorción (0.0075) debido quizás al alto porcentaje de absorción del agregado fino reciclado de concreto en comparación con el agregado natural. La mezcla No. 5 con un % de sustitución de AFN del 40% por AFRCC se comportó de manera similar a la mezcla patrón (mezcla No. 1) y obtuvieron valores inferiores a las mezclas elaboradas con AFRC sin carbonatar debido a la formación de productos de carbonatación, que produce un llenado en el sistema de poro, disminuyendo la tasa inicial de absorción. A los 180 días, las mezclas elaboradas con AFRCC presentaron una reducción de la tasa de absorción inicial menor en comparación con las mezclas elaboradas con AFN y AFRC.

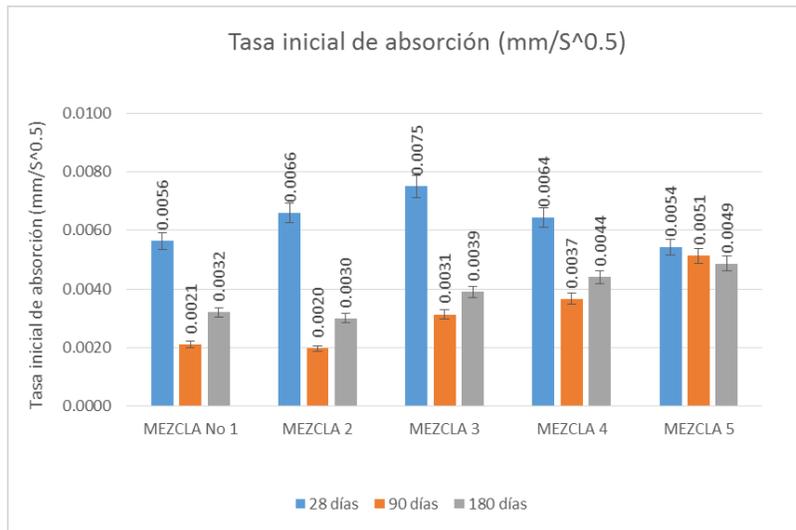


Figura 32. Tasa inicial de absorción. Fuente: Propia.

Como se aprecia en la Figura 33 el comportamiento fue similar al de la tasa de absorción inicial. En este caso la mezcla que obtuvo el mayor valor de absorción secundaria a los 28 días fue la No. 2. Sin embargo, a los 90 y 180 días las mezclas 1, 2 y 3 presentaron una tasa secundaria similar.

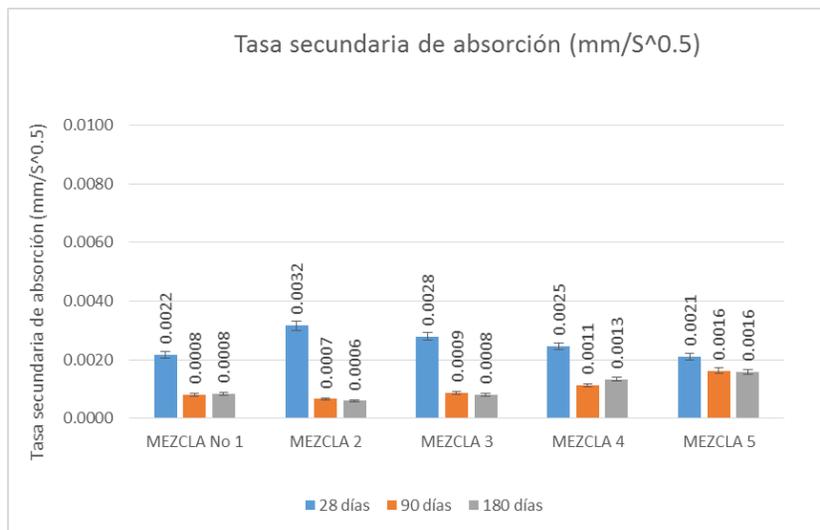


Figura 33. Tasa Secundaria de absorción. Fuente: Propia.

## 5.10 Resistencia a sulfatos

Tabla 21. Resistencia a la compresión de las muestras expuestas a sulfatos.

EDAD (días)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)S				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
7	9.22	11.11	9.82	20.80	19.00
28	22.00	24.11	22.39	25.87	29.11
56	33.32	37.29	30.55	31.42	31.24
118	36.62	42.32	38.75	31.25	32.06
208	39.28	45.39	39.51	33.67	32.21

En la Figura 34 se aprecia como la resistencia a la compresión del concreto en la mezcla de control no se ve disminuida, al estar en contacto con la solución de sulfato de magnesio, incrementando incluso su resistencia en comparación con las muestras curadas en agua. Este mismo comportamiento se aprecia en las muestras 2, 3 y 4 (Figura 35). Sin embargo en la Mezcla 5 la resistencia de la mezcla en contacto con la solución de sulfato de magnesio disminuyó un 6% a los 208 días de edad (ver Tabla 22), lo que muestra el efecto lento y nocivo sobre el concreto expuesto a las solución de sulfato, siendo esta la muestra con menor resistencia a la compresión.

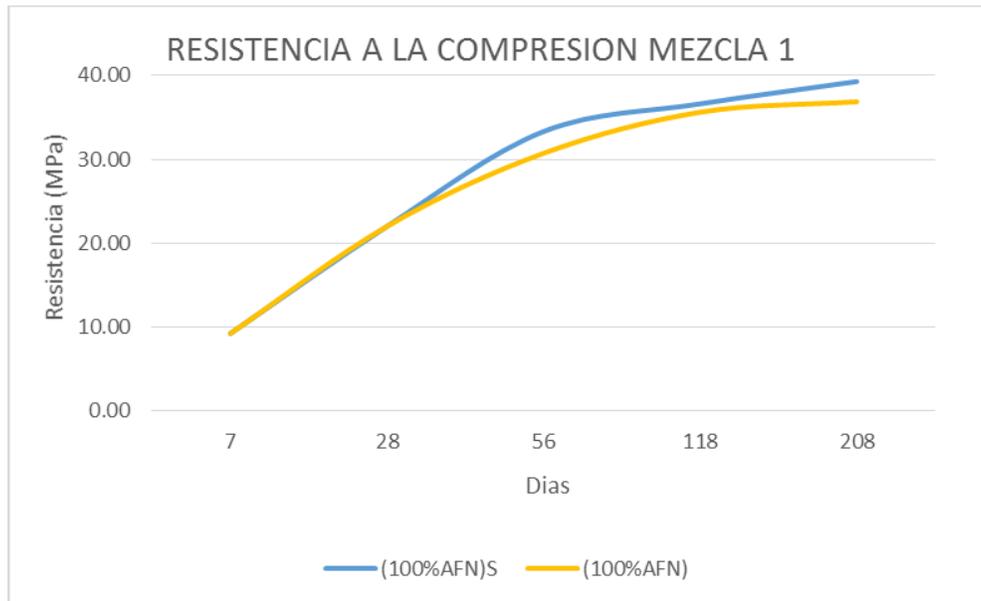


Figura 34. Resistencia a la compresión mezcla 1 sulfatos. Fuente: Propia.

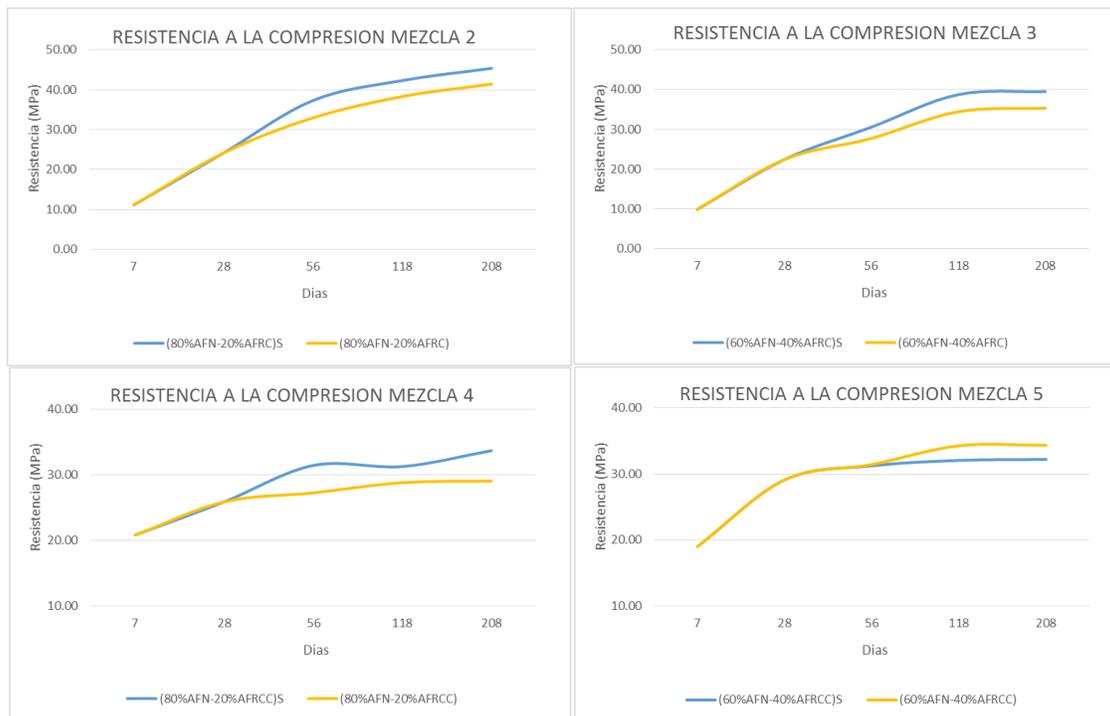


Figura 35. Resistencia a la compresión mezcla 2, 3, 4 y 5 sulfatos. Fuente: Propia.

Tabla 22. Variación de la resistencia a la compresión de las muestras expuestas a sulfatos respecto a las muestras curadas en agua.

EDAD (días)	variación relativa resistencia a la compresión														
	Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3			Mezcla 4			Mezcla 5		
	Agua	Sulfato		Agua	Sulfato		Agua	Sulfato		Agua	Sulfato		Agua	Sulfato	
7	9	9	1.00	11	11	1.00	10	10	1.00	21	21	1.00	19	19	1.00
28	22	22	1.00	24	24	1.00	22	22	1.00	26	26	1.00	29	29	1.00
56	31	33	1.08	33	37	1.13	28	31	1.10	27	31	1.15	31	31	0.99
118	36	37	1.03	38	42	1.10	34	39	1.13	29	31	1.09	34	32	0.94
208	37	39	1.07	41	45	1.10	35	40	1.12	29	34	1.16	34	32	0.94

Fuente: Propia.

El módulo de elasticidad de las muestras sometidas a la acción de sulfatos, conservaron la misma tendencia mostrada en la resistencia a la compresión, aumentando en todas las mezclas excepto en la mezcla 5 en donde se mantuvo constante.

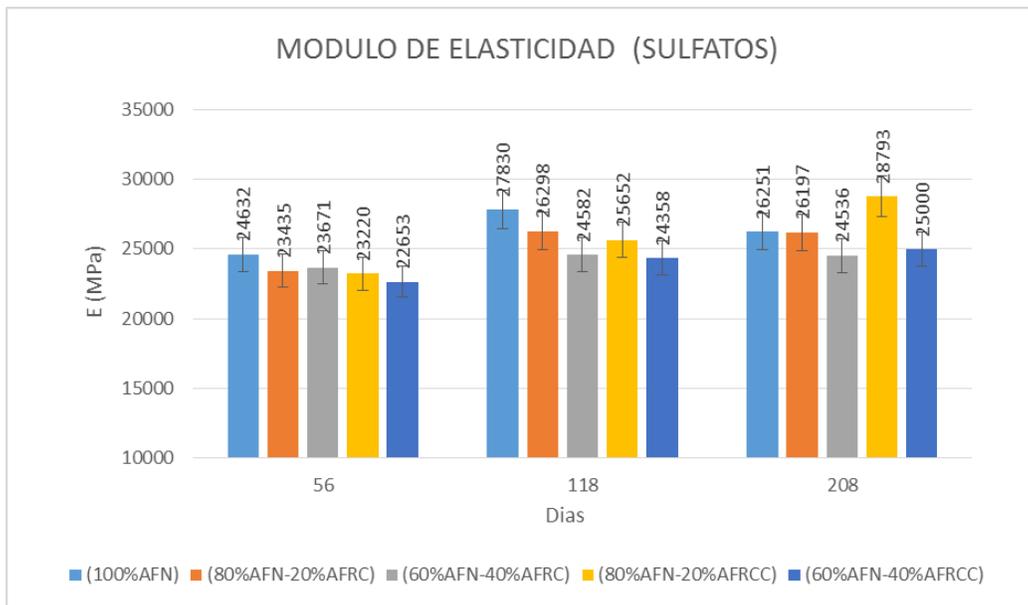


Figura 36. Módulo de elasticidad de las muestras expuestas a sulfatos. Fuente: Propia.

Se evidencio la presencia de ampollas y ablandamiento de la capa superficial de los concretos, indicando un deterioro prematuro debido al ambiente al que se encuentran expuestos (ver Figura 37). Este comportamiento se debe a la reacción del sulfato presente en el ambiente con el aluminato tricálcico del cemento presente en la mezcla.



Figura 37. Evolución muestras expuestas a solución de sulfatos. Fuente: Propia.

### 5.10.1 Expansión por sulfatos

En la Figura 38 se muestran los resultados de cambio volumétrico de las muestras que fueron expuestas a una solución de sulfato.

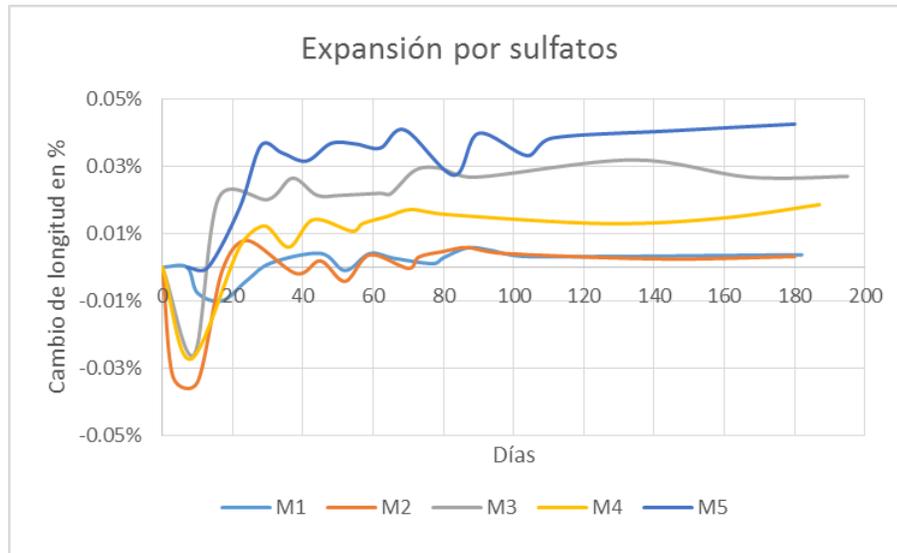


Figura 38. Expansión del concreto por exposición a sulfatos. Fuente: Propia.

Se aprecia que la mezcla de concreto con mayor porcentaje de expansión a los 180 días fue la No. 5, que tenía 40% de AFRCC, seguida de la muestra No. 3 que fue elaborada con un 40% de AFRC. La mezcla con 20% de AFRC se comportó de manera similar a la muestra patrón, presentando los porcentajes más bajos de expansión. Esto nos indica que el ataque de sulfatos es más rápido y severo en los concretos con mayor % de AFR, posiblemente debido a las características de estos agregados. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, se puede concluir que la mezcla con 40% de AFRCC es la más susceptible al ataque de sulfatos, ya que fue la única que presentó disminución en la resistencia y reportó el mayor porcentaje de expansión.

### 5.11 Cambio Volumétrico del concreto

En la Figura 39 se muestran los resultados de cambio volumétrico de las muestras que fueron curadas en la cámara con humedad y temperatura controlada.

A diferencia de las expansiones por exposición a sulfatos, la muestra que tuvo las menores contracciones fue la muestra No 5, que fue elaborada con 40% de AFRCC. La mezcla patron y las elaboradas con AFRC presentaron un comportamiento similar. La muestra con un contenido del 20% de AFRCC, registro los valores más altos de contracción pero sin estar muy lejos del comportamiento de las otras muestras.

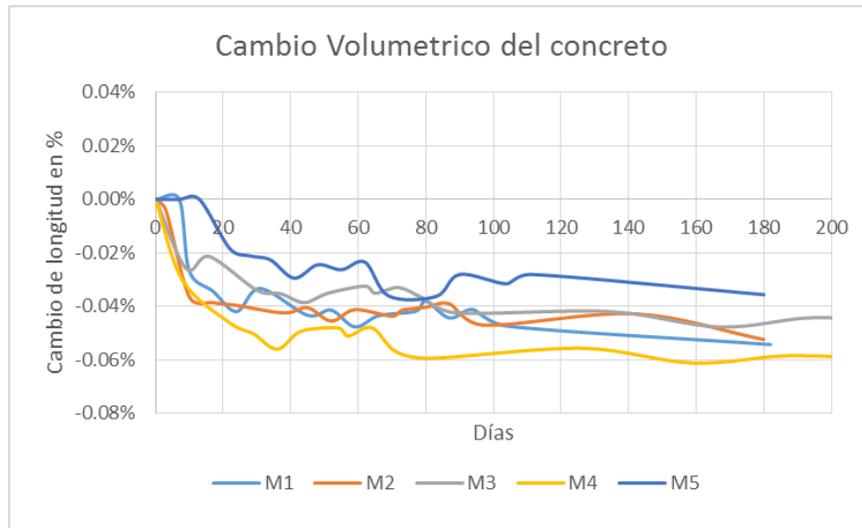


Figura 39. Cambio volumétrico del concreto. Fuente: Propia.

## Conclusiones

Con el fin de evaluar el desempeño de las mezclas de concreto, a continuación, se presenta una matriz multicriterio, en donde se asignó una calificación a partir de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados sobre las 5 muestras de concreto, a los 28 y 180 días de edad, dándole un puntaje entre 1 y 5, siendo 5 la calificación con mejor desempeño.

Tabla 23. Evaluación del desempeño a los 28 días

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Ensayo	Edad de las muestras: 28 días				
Resistencia a la compresión	1	3	2	4	5
Modulo de elasticidad	2	3	1	4	5
Tracción indirecta	1	3	2	3	3
Permeabilidad a los cloruros	4	3	2	1	1
ISAT	4	2	1	5	3
Sortividad	4	2	1	3	5
Contracción por Secado	3	2	4	1	4
Sulfatos					
Expansión en Sulfatos	5	3	1	4	2
Resistencia a la compresión					
Total	24	21	14	25	28

Fuente: Propia.

En la Tabla 23 se muestran los resultados obtenidos a los 28 días de edad de las diferentes muestras de concreto. En esta matriz podemos observar que en términos generales la mezcla que obtuvo el mejor desempeño fue la No 5, que tenía un porcentaje de sustitución de AFN del 40% con AFRCC. Esta calificación se debe a su buen comportamiento en los ensayos de resistencia a la compresión y sortividad, en donde obtuvo la calificación más alta. Sin embargo, en el ensayo de permeabilidad de cloruros obtuvo el peor desempeño junto con la muestra No.4. La muestra patrón (Muestra 1) alcanzó un resultado similar a la muestra con un 20% de AFRCC, sin embargo, se aprecia que la muestra patrón tiene un desempeño más parejo en casi todos los ensayos a excepción de la resistencia a la compresión y tracción indirecta, en donde obtuvo la calificación más baja.

Los resultados obtenidos en el laboratorio para resistencia a la compresión, mostraron que los concretos elaborados con AFRCC (mezcla 4 y 5) tuvieron el mejor desempeño a los 28 días de edad. Sin embargo, a los 90 días los concretos con AFN y AFRC ya los habían sobrepasado. Por otra parte,

se observó que la ganancia de resistencia de los concretos con AFRCC después de los 90 días es mínima.

Por otra parte, en la

Tabla 24 se ve como las mezclas con adiciones de AFRCC obtuvieron la calificación más baja, luego de promediar cada una de las calificaciones. La muestra de control y la muestra 2 que contiene un 20% de AFRC, continúan mejorando su desempeño a medida que transcurre el tiempo, aumentando su resistencia a la compresión y disminuyendo la tasa y velocidad de absorción, alcanzando las calificaciones más altas.

Tabla 24. Evaluación del desempeño a los 180 días

Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Ensayo	Edad de las muestras: 180 días				
Resistencia a la compresión	4	5	3	1	2
Modulo de elasticidad	4	3	1	2	5
Tracción indirecta	4	3	2	1	3
Permeabilidad a los cloruros					
ISAT	5	4	3	1	2
Sortividad	4	5	3	2	1
Contracción por Secado	2	3	4	1	5
Sulfatos					
Expansión en Sulfatos	4	5	2	3	1
Resistencia a la compresión	2	3	4	5	1
Total	29	31	22	16	20

Fuente: Propia.

El buen desempeño de los concretos con ARCC a edades tempranas, contrasta con el mal comportamiento de estos en los ensayos de permeabilidad de cloruros, ISAT y sortividad. En las pruebas de resistencia a los sulfatos la mezcla No. 5 (60% AFN-40% AFRCC) registro una baja en la resistencia a la compresión del 1% a los 56 días y del 6% a los 100 días. Esto pone en evidencia la baja resistencia de estos concretos a los sulfatos.

En la prueba de sortividad se observó que los concretos elaborados con AFRCC presentan una tasa de absorción mayor. Mostró que las sustituciones de AFN por AFRC no alteran sustancialmente la tasa de absorción de los concretos, lo que nos indica que la utilización de AFRC no afecta en gran medida la tasa de absorción superficial de los concretos. Los concretos con AFRCC pueden ser más susceptibles a procesos de deterioro lento, como la carbonatación, ya que sus propiedades de

durabilidad no muestran una mejora en el tiempo en comparación con la muestra patrón o los concretos con AFRC.

Se puede ver claramente que la resistencia a la compresión de los concretos, no siempre está relacionada con la permeabilidad y su desempeño frente a las acciones agresivas a las que puede estar expuesto. Las adiciones y/o sustituciones en los concretos deben ser estudiadas y analizadas con cuidado, evaluando siempre las propiedades mecánicas y de durabilidad, con el fin de encontrar el verdadero desempeño y funcionalidad. A partir de este análisis se concluye que la utilización de agregados reciclados de concreto carbonatado puede ser viable, siempre y cuando se tengan en cuenta las condiciones de exposición a las que estará sometido.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los agregados reciclados de concreto carbonatados, podrían utilizarse en la fabricación de nuevos concretos, en estructuras que no estén rodeadas de ambientes agresivos que contengan cloruros o sulfatos.

## **Recomendaciones**

De acuerdo con los resultados obtenidos se realizan las siguientes recomendaciones:

Realizar un estudio sobre muestras de concreto certificado de planta con diferentes resistencias especificadas por el proveedor y verificar las propiedades de permeabilidad. Estos ensayos deben realizarse durante periodos de tiempo más largos, con el fin de tener una muestra significativa en el tiempo.

Realizar un estudio adicional con diferentes relaciones a/c y comparar con los valores obtenidos, encontrando porcentajes de mejora y utilizando porcentajes superiores de sustitución.

Se recomienda realizar pruebas sobre viguetas de 15x15x50cm, con el fin de determinar el módulo de rotura de estos concretos.

Realizar un análisis económico de este proceso, con el fin de verificar la viabilidad de carbonatar los agregados reciclados de concreto de manera industrial. Adicionalmente valorar el aporte que este tipo de agregado podría hacer a las certificaciones de construcción verde como la LEED.

## Referencias

- ACI-228.1R-03. (2003). *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. ACI Committee 228.
- ARGOS. (s.f.). Ficha Técnica Cemento Gris de Uso General. Obtenido de <https://www.argos.co/Media/Colombia/images/Ficha%20T%C3%A9cnica%20Cemento%20Gris%20de%20Uso%20General.pdf>
- ASTM-C1012. (2004). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. ASTM Subcommittee C01.29 on Sulfate Resistance.
- ASTM-C1202-2. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM Subcommittee C09.66.
- ASTM-C1585-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. ASTM Subcommittee C09.66 on Concrete's Resistance to Fluid Penetration.
- Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol 30 N°2*, 99-108.
- Bobicki, E., Liu, Q., Xu, Z., & Zeng, H. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science* 38 , 302-320.
- Bojacá, N. (2013). *Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos con Agregado Reciclado*. (Tesis de Maestría), Bogotá D.C., Colombia.
- BS-1881-part-208. (1996). *recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete*. British standard Subcommittee B/517/1.
- Camacol. (30 de Octubre de 2015). Recuperado el 01 de 12 de 2015, de Camacol: <http://camacol.co/noticias/camacol-prev%C3%A9-un-crecimiento-de-97-para-la-construcci%C3%B3n-de-edificaciones-en-2016>
- Camposano, J. (2012). El hormigón trabajando a tracción. *4° congreso Iberoamericano de pavimentos de concreto*. Ecuador. Obtenido de

- [http://www.concretonline.com/pdf/00hormigon/art\\_tec/El\\_Hormigon\\_a%20traccion.pdf](http://www.concretonline.com/pdf/00hormigon/art_tec/El_Hormigon_a%20traccion.pdf)
- CCCS, C. d. (s.f.). *Consejo de Construcción Sostenible Colombia*. Obtenido de <http://www.cccs.org.co/construccion-sostenible/que-es>
- Chávez, Á., & Guarín, N. (2014). Gestión logística y operacional de la unidad de reciclaje de residuos de construcción y demolición. *Revista Ingeniería Industrial 13 N°2*, 7-18.
- Clemente, M. d., & Naharro, J. (2009). comparación de las tecnologías de captura y almacenamiento de Co2 en la generación de energía. *Anales de la Real Academia de Doctores de España, Volumen 13*, 19-29.
- Emas, P. (2016). Aprovechamiento Residuos de Construcción y Demolición RCD Emas Pasto. Recuperado el 2018, de <https://www.youtube.com/watch?v=-puJuNQwsUo>
- Engelsen , C., Henning , D., Mehus, J., & Pade, C. (2005). Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *Nordic Innovation Centre 03018*.
- Escandon, J. C. (2011). *Diagnóstico Técnico y Económico del Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición en Edificaciones en la Ciudad de Bogotá*. (Tesis de pregrado), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites Volume 29, Issue 5*, 397-401.
- Fröhlich, J., Hentges, T., & Kulakowski, M. (2014). Empleo de Agregados Reciclados de Concreto Carbonatados na Produção de Novos Concretos. *Revista de Engenharia Civil IMED, 1(2)*, 3-9.
- Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. (Tesis de doctorado), Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- García, C., Grouh, N., Hidalgo, A., & all, e. (2008). New insights on the use of supercritical carbon dioxide for the accelerated carbonation of cement pastes. *The journal of Supercritical Fluids 43*, 500-509.

- GRECO, G. R. (2017). Video Institucional GRECO. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Fqed3EAVetU>
- Guacaneme, F. (2015). *Ventajas y usos del concreto reciclado*. (Ensayo inedito), Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.
- IDU. (diciembre de 2017). Directorio Proveedores y Sitios de Disposición Final.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2006). Cemento y Concreto Resistente a Sulfatos. (I. M. Concreto, Ed.) *El Concreto en la Obra*, 44-47.
- Laverde, J. (2014). *Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados*. (Tesis de Maestría), Escuela colombiana de ingeniería julio garavito, Bogotá D.C., Colombia.
- Martinez, B., Flores, J., Uribe, R., & Medina, O. (2003). La prueba de permeabilidad rapida a cloruros como indice de durabilidad de las estructuras de hormigon. *Mater Construcc Vol. 53*, 271-272.
- Mena, C., & Valdés, Y. (2014). *Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de Cali para uso en obras viales de bajo transito*. (Tesis de pregrado), Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Cauca, Colombia.
- Minambiente. (2017). Protocolo de Kioto. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/458-plantilla-cambio-climatico-14>
- Molano, M., Torres, N., & Molano, C. (2014). Evaluación de los beneficios de la captura de CO2 para el tratamiento de agregados finos reciclados de concreto, como una estrategia para combatir el cambio climático. *Revista Escuela Colombiana De Ingeniería*.
- Monje, C., & Rodríguez, D. (2016). *Carbonatación acelerada en agregados reciclados de concreto y evaluación de su desempeño en mezclas de concreto para vías*. (Tesis de maestria), Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C., Colombia.

- Mora , D. (2016). *Propiedades mecánicas y de permeabilidad de concreto fabricado con agregado reciclado*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Morales, H., & Torres, C. (2008). *Tecnologías de captura y secuestro de CO2*. Pontificia Universidad Católica De Chile. Obtenido de <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf>
- Muñoz, A. (2016). *Carbonatación acelerada de agregados finos reciclados y su influencia en mezclas de mortero*. (Tesis de Maestría), Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Colombia.
- Novoa, G. (2010). *Efecto del uso de ceniza volante como material cementante en la tasa de carbonatación del concreto*. Escuela colombiana de ingeniería julio garavito, Bogotá D.C.
- NSR-10. (2010). Reglamento Colombiano De Construcción Sismoresistente NSR-10.
- Pasto, E. (2016). Aprovechamiento Residuos de Construcción y Demolición RCD Emas Pasto. Recuperado el 2017, de <https://www.youtube.com/watch?v=-puJuNQwsUo>
- Rivera, G. (2013). *Concreto simple*. Recuperado el 15 de 11 de 2017, de <https://civilgeeks.com/2013/08/28/libro-de-tecnologia-del-concreto-y-mortero-ing-gerardo-a-rivera-l/>
- Rodríguez, S. (2016). *Evaluación de los efectos del curado interno en el concreto*. (Tesis de Maestría), Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.
- Sanchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá D.C.: Bhandar Editores Ltda.
- SDA, S. D. (26 de 09 de 2012). Lineamientos Técnicoambientales Para Las Actividades De Aprovechamiento Y Tratamiento De Los Residuos De Construcción Y Demolición en El Distrito Capital.
- SDA, S. D. (s.f.). Guía Ambiental Para el Manejo de Escombros en la Ciudad de Bogotá D.C.

- Shi-Cong, K., Bao-jian, Z., & Chi-Sun, P. (2014). Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregate. *Cement & Concrete Composites* 45, 22-28.
- Silva , O. J. (2017). Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto. Bogotá D.C. Obtenido de Blog 360° en Concreto: <http://blog.360gradosenconcreto.com/>
- Sordo, J. (2010). *CO<sub>2</sub> y el cambio climático*. Obtenido de <http://www.homohominisacrares.net/sec/ecologia/co2/co2.htm>
- TOXEMENT. (2016). *Catalogo de productos*. Obtenido de [http://www.toxement.com.co/media/1640/cata-logo\\_regionales.pdf](http://www.toxement.com.co/media/1640/cata-logo_regionales.pdf)
- Uenoa, A., Kawaib, K., Kobayashic, K., & et all. (2014). Evaluation of visual methods for CO<sub>2</sub> uptake by demolished concrete: Research activities by JSCE subcommittee 219. *Construction and Building Materials Volume 67, Part C*, 393-398.
- Zega, C., & Di Maio, Á. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management* 31, 2336–2340.
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu , W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186.

## Anexos

A continuación se presentan los registros de los datos obtenidos en los ensayos a diferentes edades (7, 28, 90, 180 y 360 días):

### 1) Resistencia a la compresión

<b>Mezcla 1</b>						<b>Mezcla 2</b>					
<b>Mezcla 1 (7 días) f<sub>c</sub></b>						<b>Mezcla 2 (7 días) f<sub>c</sub></b>					
Cilindro	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
1	7200	20.3	10.1	80.12	8.99	1	8800	20.4	10.2	81.71	10.77
2	7600	20.3	10.1	80.12	9.49	2	9250	20.4	10.1	80.12	11.55
3	7350	20.4	10.1	80.12	9.17	3	8800	20.3	10.0	78.54	11.20
Promedio					9.22	Promedio					11.17
<b>Mezcla 1 (28 días) f<sub>c</sub></b>						<b>Mezcla 2 (28 días) f<sub>c</sub></b>					
Cilindro	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
1	17600	20.2	10.1	80.12	21.97	1	18300	20.3	10.1	80.12	22.841
2	18100	20.3	10.1	80.12	22.59	2	19150	20.3	10.1	80.12	23.90
3	16850	20.2	10	78.54	21.45	3	20900	20.2	10.2	81.71	25.58
Promedio					22.00	Promedio					24.11
<b>Mezcla 1 (90 días) f<sub>c</sub></b>						<b>Mezcla 2 (90 días) f<sub>c</sub></b>					
Cilindro	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
1	27400	20.3	10.2	81.71	33.53	1	28650	20.3	10.2	81.71	35.063
2	28700	20.3	10.1	80.12	35.82	2	31200	20.3	10.1	80.12	38.94
3	28900	20.3	10.1	80.12	36.07	3	29700	20.3	10.1	80.12	37.07
Promedio					35.14	Promedio					37.02
<b>Mezcla 1 (180 días) f<sub>c</sub></b>						<b>Mezcla 2 (180 días) f<sub>c</sub></b>					
Cilindro	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
1	28800	20	10	78.54	36.67	1	26200	20.3	10.2	81.71	
2	30750	20.3	10.1	80.12	38.38	2	33800	20.3	10.2	81.71	41.37
3	28100	20.3	10.1	80.12	35.07	3	32800	20.4	10.1	80.12	40.94
Promedio					36.71	Promedio					41.15
<b>Mezcla 1 (360 días) f<sub>c</sub></b>						<b>Mezcla 2 (360 días) f<sub>c</sub></b>					
Cilindro	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)
1	30000	20	10	78.54	38.20	1					
2	29900	20.3	10.1	80.12	37.32	2	33100	20.3	10.2	81.71	40.51
3						3	36900	20.4	10.1	80.12	46.06
Promedio					37.76	Promedio					43.28
<b>Mezcla 3</b>						<b>Mezcla 4</b>					

Mezcla 3 (7 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	7400	20.2	10.0	78.54	9.422
2	7600	20.1	10.0	78.54	9.68
3	8300	20.3	10.1	80.12	10.36
Promedio					9.82
Mezcla 3 (28 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	17850	20.4	10.0	78.54	22.727
2	17150	20.2	10.1	80.12	21.41
3	18450	20.2	10.1	80.12	23.03
Promedio					22.39
Mezcla 3 (90 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	27800	20.3	10.2	81.71	34.023
2	27200	20.3	10.2	81.71	33.29
3	28250	20.2	10.1	80.12	35.26
Promedio					34.19
Mezcla 3 (180 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	28350	20.3	10.1	80.12	35.384
2	27700	20.3	10.1	80.12	34.57
3	28200	20.2	10.1	80.12	35.20
Promedio					35.05
Mezcla 3 (360 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1					
2	28900	20.3	10.1	80.12	36.07
3	31700	20.2	10.1	80.12	39.57
Promedio					37.82
Mezcla 4 (7 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	16200	20.4	10.1	80.12	20.22
2	16300	20.2	10.1	80.12	20.34
3	17500	20.2	10.1	80.12	21.84
Promedio					20.80
Mezcla 4 (28 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	19800	20.4	10.1	80.12	24.713
2	20700	20.3	10.1	80.12	25.84
3	22100	20.3	10.2	81.71	27.05
Promedio					25.87
Mezcla 4 (90 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	22650	20.3	10.1	80.12	28.27
2	24200	20.3	10.1	80.12	30.21
3	22600	20.3	10.1	80.12	28.21
Promedio					28.89
Mezcla 4 (180 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1	23650	20.3	10.2	81.71	28.944
2	24400	20.3	10.1	80.12	30.45
3	23500	20.2	10.1	80.12	29.33
Promedio					29.58
Mezcla 4 (360 días) f'c					
Muestra	Carga (Kgf)	H (cm)	D (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)
1					
2	25400	20.2	10.0	78.54	32.34
3	24500	20.3	10.1	80.12	30.58
Promedio					31.46

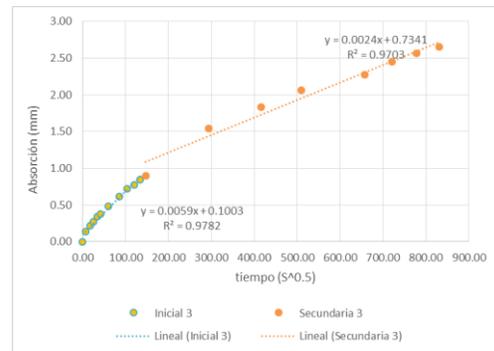
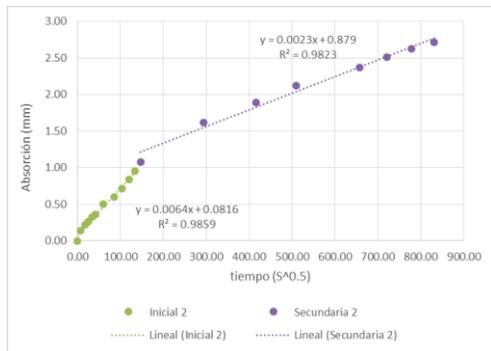
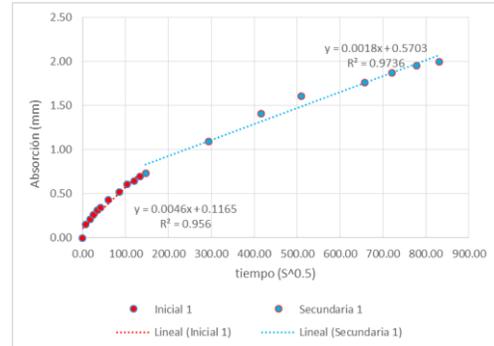
Mezcla 5

<b>Mezcla 5 (7 días) f'c</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>Area (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (MPa)</b>
1	15100	20	10.0	78.54	19.226
2	15600	20.1	10.0	78.54	19.86
3	14200	20.1	10.0	78.54	18.08
Promedio					19.06
<b>Mezcla 5 (28 días) f'c</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>Area (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (MPa)</b>
1	23050	20.4	10.0	78.54	29.348
2	22650	20.2	10.1	80.12	28.27
3	23800	20.2	10.1	80.12	29.71
Promedio					29.11
<b>Mezcla 5 (90 días) f'c</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>Area (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (MPa)</b>
1	26200	20	10.0	78.54	33.359
2	27000	20	10.0	78.54	34.38
3	27550	20.1	10.0	78.54	35.08
Promedio					34.27
<b>Mezcla 5 (180 días) f'c</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>Area (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (MPa)</b>
1	21750	20.1	10.0	78.54	
2	23350	20.2	10.0	78.54	29.73
3	24600	20	10.0	78.54	31.32
Promedio					30.53
<b>Mezcla 5 (3560 días) f'c</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>Area (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f'c (MPa)</b>
1					
2	27400	20.2	10.0	78.54	34.89
3	27000	20	10.0	78.54	34.38
Promedio					34.63

## 2) Sortividad

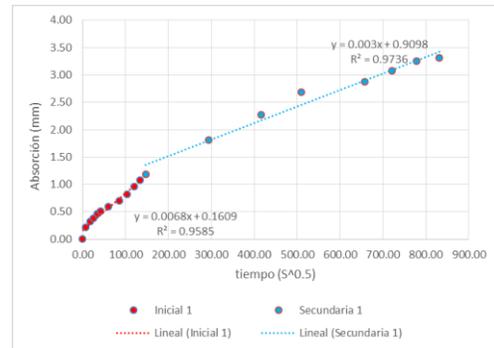
## a) Mezcla 1

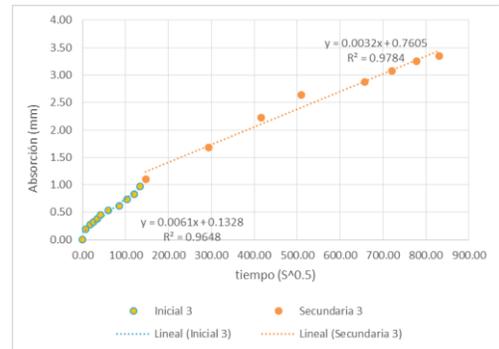
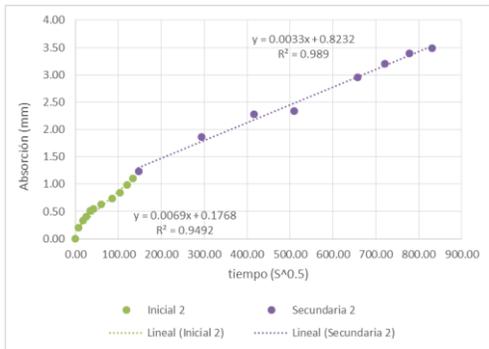
MEZCLA 1									
FECHA DE MEZCLADO					30/08/2016				
FECHA ENSAYO					07/10/2016				
EDAD					T°C Concreto				
		Muestra No 1			Muestra No 2		Muestra No 3		
Tiempo	Masa (gr)	S	S*1/2	Absorción 1 (mm)	Masa (gr)	Absorción 1	Masa (gr)	Absorción 1	
0 min	852.69	0.00	0.00	0.00	860.52	0.00	842.89	0.00	
1 min	853.87	60.00	7.75	0.15	861.61	0.14	843.99	0.14	
5 min	854.35	300.00	17.25	0.21	862.22	0.22	844.66	0.22	
10 min	854.76	600.00	24.49	0.26	862.63	0.27	845	0.27	
20 min	855.18	1200.00	34.64	0.32	863.09	0.33	845.56	0.34	
30 min	855.4	1800.00	42.43	0.35	863.38	0.36	845.85	0.36	
60 min	856.1	3600.00	60.00	0.43	864.5	0.51	846.71	0.49	
2 horas	856.81	7200.00	84.85	0.52	865.23	0.60	847.72	0.61	
3 horas	857.47	10800.00	103.92	0.61	866.12	0.71	848.59	0.73	
4 horas	857.79	14400.00	120.00	0.65	867.09	0.84	849	0.78	
5 horas	858.16	18000.00	134.16	0.70	868.05	0.96	849.57	0.85	
6 horas	858.47	21600.00	146.97	0.74	869	1.08	849.97	0.90	
1 día	861.29	86400.00	293.94	1.09	873.26	1.62	855	1.54	
2 días	863.77	172800.00	415.69	1.41	875.38	1.89	857.37	1.83	
3 días	865.32	259200.00	509.12	1.61	877.22	2.13	859.09	2.06	
5 días	866.56	432000.00	657.27	1.77	879.14	2.37	860.36	2.26	
6 días	867.43	518400.00	720.00	1.88	880.25	2.51	862.16	2.45	
7 días	868.02	604800.00	777.69	1.95	881.19	2.63	863.06	2.57	
8 días	868.42	691200.00	831.38	2.00	881.84	2.71	863.75	2.66	



## b) Mezcla 2

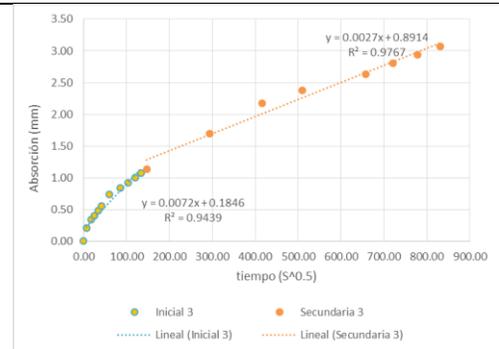
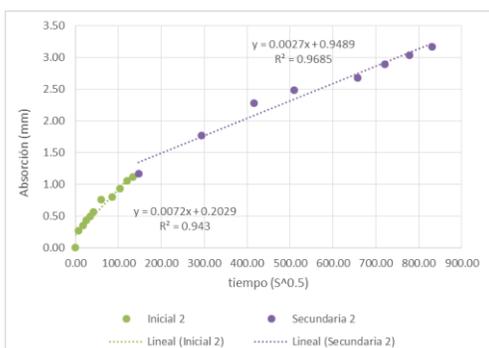
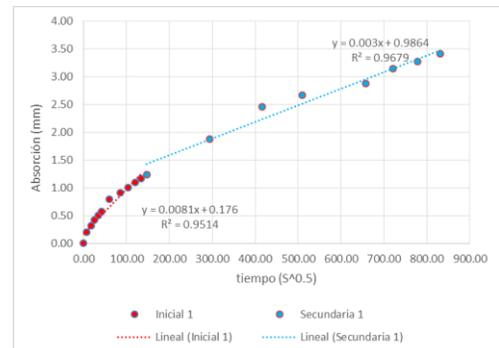
MEZCLA 2									
FECHA DE MEZCLADO					06/09/2016				
FECHA ENSAYO					22/10/2016				
EDAD					T°C Concreto				
		Muestra No 1			Muestra No 2		Muestra No 3		
Tiempo	Masa (gr)	S	S*1/2	Absorción 1 (mm)	Masa (gr)	Absorción 1	Masa (gr)	Absorción 1	
0 min	847.04	0.00	0.00	0.00	856.61	0.00	847.17	0.00	
1 min	848.74	60.00	7.75	0.22	858.22	0.20	848.08	0.19	
5 min	849.54	300.00	17.25	0.32	859.23	0.32	849.33	0.28	
10 min	850.01	600.00	24.49	0.38	859.83	0.41	849.66	0.32	
20 min	850.64	1200.00	34.64	0.46	860.59	0.51	850.16	0.38	
30 min	851.08	1800.00	42.43	0.51	860.69	0.55	850.71	0.45	
60 min	851.72	3600.00	60.00	0.60	861.6	0.64	851.32	0.53	
2 horas	852.53	7200.00	84.85	0.70	862.36	0.74	851.99	0.61	
3 horas	853.42	10800.00	103.92	0.81	863.26	0.85	852.96	0.74	
4 horas	854.6	14400.00	120.00	0.96	864.36	0.99	853.71	0.83	
5 horas	855.51	18000.00	134.16	1.08	865.27	1.10	854.8	0.97	
6 horas	856.38	21600.00	146.97	1.19	866.1	1.23	855.78	1.10	
1 día	861.27	86400.00	293.94	1.81	871.25	1.86	860.36	1.66	
2 días	864.87	172800.00	415.69	2.27	874.55	2.24	864.61	2.22	
3 días	868.1	259200.00	509.12	2.68	874.93	2.33	867.86	2.63	
5 días	869.63	432000.00	657.27	2.88	878.8	2.95	869.36	2.88	
6 días	871.21	518400.00	720.00	3.08	881.73	3.20	871.34	3.08	
7 días	872.59	604800.00	777.69	3.25	883.28	3.40	872.74	3.26	
8 días	873.07	691200.00	831.38	3.31	884.02	3.49	873.43	3.34	



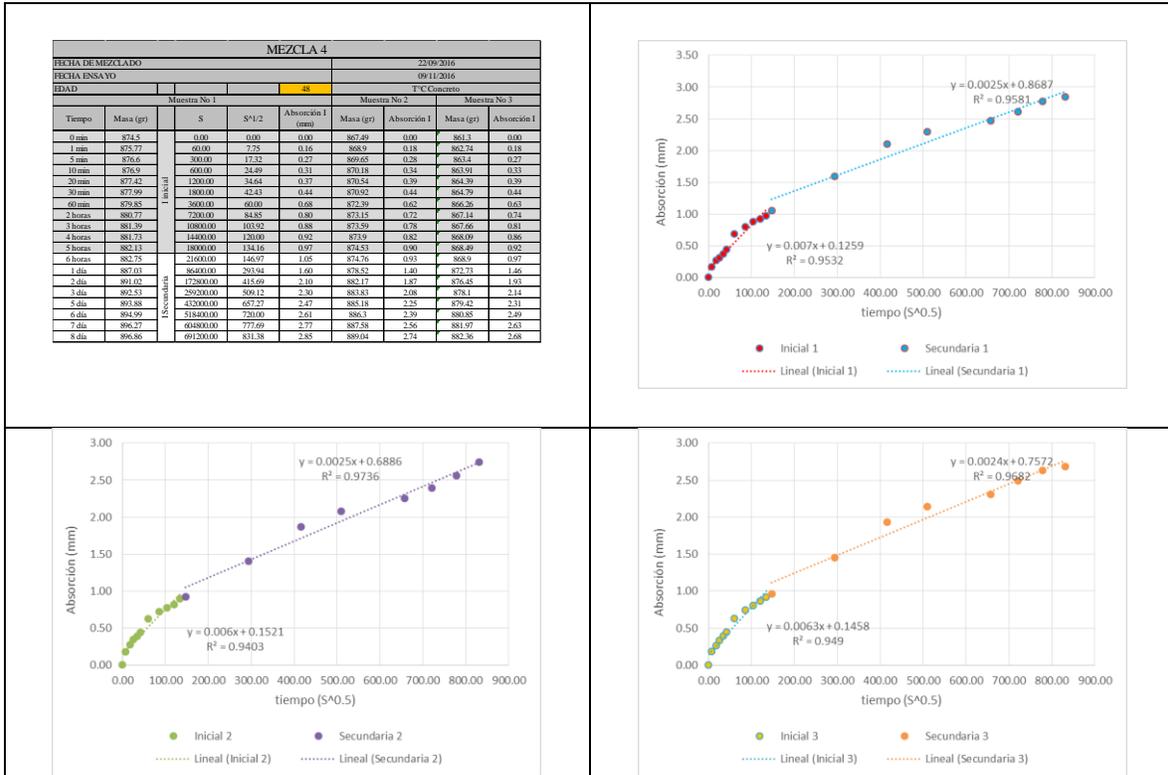


**c) Mezcla 3**

MEZCLA 3							
FECHA DE MEZCLADO				14/09/2016			
FECHA ENSAYO				26/10/2016			
EDAD				7°C Concreto			
		Muestra No 1		Muestra No 2		Muestra No 3	
Tempo	Masa (gr)	S	S <sup>0.5</sup> /2	Absorción I (mm)	Masa (gr)	Absorción I	Masa (gr)
0 min	828.81	0.00	0.00	0.00	829.08	0.00	829.56
1 min	830.38	60.00	7.75	0.20	831.27	0.27	841.27
5 min	831.34	300.00	17.32	0.32	831.86	0.35	842.23
10 min	832.11	600.00	24.49	0.42	832.45	0.43	842.69
20 min	832.8	1200.00	34.64	0.51	832.99	0.50	843.32
30 min	833.35	1800.00	42.43	0.58	833.49	0.56	843.94
60 min	835.1	3600.00	60.00	0.80	835.05	0.76	845.32
2 horas	836	7200.00	84.85	0.92	835.28	0.80	846.14
3 horas	836.74	10800.00	103.92	1.01	836.4	0.93	846.8
4 horas	837.44	14400.00	120.00	1.10	837.34	1.05	847.43
5 horas	838.02	18000.00	134.16	1.17	837.82	1.11	848
6 horas	838.49	21600.00	146.07	1.23	838.27	1.17	848.44
1 día	841.61	86400.00	291.94	1.88	843.02	1.77	852.88
2 días	848.12	172800.00	415.69	2.56	846.99	2.28	856.64
3 días	849.79	259200.00	509.12	2.67	848.65	2.49	858.22
5 días	851.41	432000.00	657.27	2.88	850.16	2.68	860.2
6 días	851.52	518400.00	720.00	3.15	851.83	2.90	861.56
7 días	851.58	604800.00	777.09	3.28	852.92	3.03	862.62
8 días	855.63	691200.00	831.38	3.41	853.99	3.17	863.68



### d) Mezcla 4



### e) Mezcla 5

