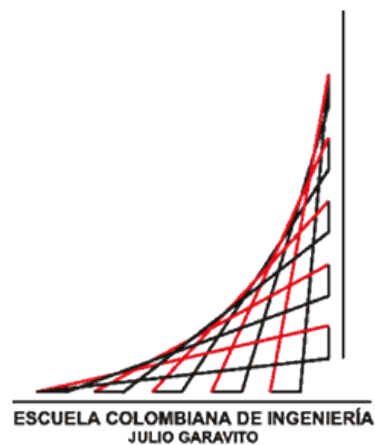


**PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON
AGREGADO RECICLADO**

Ing. NÉSTOR RAÚL BOJACÁ CASTAÑEDA



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ, D.C.
2013**

**PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON
AGREGADO RECICLADO**

Presentado por:

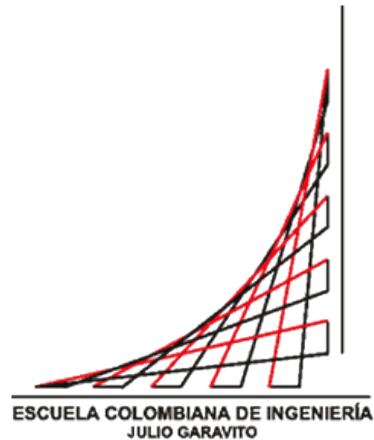
Ing. NÉSTOR RAÚL BOJACÁ CASTAÑEDA

PROYECTO DE GRADO

Directores:

Ing. NANCY TORRES CASTELLANOS

Ing. PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ, D.C.
2013**

Bogotá D.C., 25 de noviembre de 2013

Señor

Ing. GERMÁN SANTOS GRANADOS

Director Programa de Maestría en Ingeniería Civil en Estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

La ciudad

Ref: Proyecto de Grado

Respetado Ingeniero:

Por medio del siguiente documento me permito presentar el informe final del Proyecto de Grado del aspirante al título de Magister en Ingeniería Civil, Néstor Raúl Bojacá Castañeda, con C.C. 79.527.973 de Bogotá, denominado “**PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO**”, que fue dirigida por la Ingeniera Nancy Torres Castellanos y el Ingeniero Pedro Nel Quiroga Saavedra y cuyos jurados fueron la Ingeniera Sandra Patricia Aguilar Cardona y el Ingeniero José Gabriel Gómez Cortés.

Atentamente,

Ing. NÉSTOR RAÚL BOJACÁ CASTAÑEDA

NOTA DE ACEPTACIÓN

El Proyecto de Grado denominado **“PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO”**, presentado para optar al Título de Magister en Ingeniería Civil otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Directores:

Ing. NANCY TORRES CASTELLANOS

Ing. PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

Jurados:

Ing. SANDRA PATRICIA AGUILAR CARDONA

Ing. JOSÉ GABRIEL GÓMEZ CORTÉS

Bogotá D.C., 25 de noviembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a todas las personas que contribuyeron a la consecución de este Proyecto de Grado, especialmente:

Al ingeniero Germán Santos Granados, Director del Programa de Maestría en Ingeniería Civil en Estructuras por el apoyo para la culminación de este proyecto.

A la Ingeniera Nancy Torres Castellanos, directora del proyecto por su paciencia, comprensión y ayuda, sin estas cualidades no hubiera sido posible lograr el objetivo trazado.

Al Ingeniero Pedro Nel Quiroga Saavedra, por su paciencia, colaboración, orientación, ayuda y sencillez, sin estas cualidades no hubiera sido posible lograr el objetivo trazado.

A todos los profesores de la Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

A todos los compañeros que laboran en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

De manera muy especial a la Imprenta Nacional de Colombia

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. JUSTIFICACIÓN.....	18
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. ACTIVIDADES A REALIZAR.....	23
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
5.1 MATERIALES UTILIZADOS	45
5.1.1 Cemento.....	46
5.1.2 Agregado Fino Natural.....	46
5.1.3 Agregado Grueso Reciclado.....	46
5.1.4 Aditivo.....	47
5.1.5 Relación agua/cemento (A/C).....	47
5.1.6 Nomenclatura utilizada porcentaje de reemplazo de agregado grueso	47
5.1.7 Ambiente de curado.....	48
5.1.8 Edades de ensayo	48
5.2 ENSAYOS REALIZADOS	48
5.2.1 Ensayos para determinar propiedades físicas de los materiales utilizados. 49	
5.2.1.1 Cemento.....	49
5.2.1.2 Granulometría.....	50
5.2.1.3 Agregado fino natural	50
5.2.1.4 Agregado grueso natural	51
5.2.1.5 Agregado grueso reciclado.....	52
5.2.1.6 Peso unitario	52

5.2.1.7	Densidad y absorción	52
5.2.1.8	Coeficiente de forma del agregado grueso natural y reciclado	53
5.2.1.10	Ensayo de resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles.....	53
5.2.1.11	Ensayo de Micro Deval.....	54
5.2.2	Diseño de mezclas.....	54
5.2.3	Concreto en estado fresco.....	55
5.2.4	Concreto en estado endurecido.....	56
5.2.4.1	Resistencia a la compresión (f'_c)	56
5.2.4.2	Módulo de elasticidad.....	56
5.2.4.3	Ensayo a la flexión.....	57
5.2.4.4	Velocidad de pulso ultrasónico (UPV).....	57
5.2.5	ENSAYOS DE DURABILIDAD	58
5.2.5.1	Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros	58
5.2.5.2	Carbonatación.....	59
5.2.5.3	Tasa de absorción superficial inicial ISAT	60
5.2.5.4	Sortividad	61
5.2.5.5	Sulfatos	62
6.	RESULTADOS OBTENIDOS	63
6.1	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	63
6.1.1	Cemento.....	63
6.1.2	Agregado Fino Natural.....	63
6.1.3	Agregado grueso natural	64
6.1.4	Agregado grueso reciclado.....	64
6.1.5	Coeficiente de forma del agregado grueso natural y reciclado	66
6.1.6	Ensayo de resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles.....	66
6.1.7	Ensayo de Micro Deval	67

6.2	DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO	68
6.3	ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO	69
6.4	ENSAYOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO	70
6.4.1	Ensayo a la compresión.....	70
6.4.2	Módulo de elasticidad	72
6.4.3	Ensayo a la flexión	75
6.4.4	Velocidad de pulso ultrasónico	77
6.5	ENSAYOS DE DURABILIDAD.....	80
6.5.1	Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros.....	80
6.5.2	Carbonatación	81
6.5.3	Tasa de absorción superficial inicial (ISAT)	83
6.5.4	Sortividad	86
6.5.5	Sulfatos	88
7.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	90
7.1	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS.....	90
7.1.1.	Densidad	90
7.1.2.	Absorción	90
7.1.3.	Masa Unitaria	91
7.2	CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	92
7.3	CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	93
7.3.1	Resistencia a compresión.....	93
7.3.2	Módulo de elasticidad	94
7.3.3	Módulo de rotura (MR).....	94
7.3.4	Velocidad de pulso ultrasónico (UPV).....	95
7.4	DURABILIDAD	95
7.4.1	Permeabilidad a cloruros	95

7.4.2 Carbonatación.....	96
7.4.3 ISAT.....	97
7.4.4 Sortividad	97
7.4.5 Sulfatos	98
8. APLICACIÓN PRÁCTICA.....	99
8.1 ENSAYO DE LOSAS DE CONCRETO RECICLADO	99
8.2 PROCEDIMIENTO.....	102
8.3 RESULTADOS OBTENIDOS	103
BIBLIOGRAFÍA	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados propiedades físicas agregado fino natural.....	64
Tabla 2. Resultados propiedades físicas agregado grueso natural.....	64
Tabla 3. Resultados propiedades físicas agregado grueso reciclado.....	65
Tabla 4. Comparación propiedades físicas agregados natural y reciclado.....	65
Tabla 5. Resultados coeficiente de forma agregado grueso natural.....	66
Tabla 6. Resultados ensayo de desgaste en la Máquina de los Ángeles.....	67
Tabla 7. Resultados ensayo Micro Deval.....	67
Tabla 8. Resumen de las Propiedades físicas y mecánicas de los agregados gruesos ...	68
Tabla 9. Proporciones de materiales en cada mezcla (kg/m ³).....	68
Tabla 10. Resultados obtenidos concreto en estado fresco.....	69
Tabla 11. Resistencia promedio a la compresión obtenida (MPa).....	70
Tabla 12. Promedio módulo de elasticidad (MPa).....	72
Tabla 13. Comparación coeficientes de elasticidad K, a los 28 días.....	74
Tabla 14. Promedio de resistencia a la flexión a los 28 días de edad.....	76
Tabla 15. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico (m/s).....	77
Tabla 16. Resumen promedio de las propiedades mecánicas a los 28 días.....	79
Tabla 17. Promedio penetración de cloruros (Coulombs).....	80
Tabla 18. Profundidad de carbonatación inicial y final (mm).....	81
Tabla 19. Constantes de carbonatación acelerada (Kc) y ambiente (Ka).....	81
Tabla 20. Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m ² x s), ISAT (46 días).....	83
Tabla 21. Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m ² x s), ISAT (58 días).....	85
Tabla 22. Promedio datos obtenidos de sortividad (mm/s ^{1/2}).....	87
Tabla 23. Información especímenes antes de introducir en solución de sulfatos.....	88
Tabla 24. Especímenes después de introducir 68 días en solución de sulfatos.....	89
Tabla 25. Porcentaje de expansión cilindros de concreto.....	89
Tabla 26. Resumen cargas teóricas de falla estimadas.....	105
Tabla 27. Resumen cargas teóricas de falla estimadas.....	106
Tabla 28. Cargas y deformaciones máximas en losas.....	107

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Programa experimental.....	45
Gráfico 2. Ensayos realizados	49
Gráfico 3. Granulometría agregado fino de Tabio, Cundinamarca.....	51
Gráfico 4. Granulometría agregado grueso de Tabio, Cundinamarca	51
Gráfico 5. Granulometría agregado grueso reciclado (Cilindros ECI)	52
Gráfico 6. Método de Fuller Agregado Grueso Natural y Agregado Grueso Reciclado.....	55
Gráfico 7. Esquema del montaje ensayo penetración de cloruros. Gómez G.	59
Gráfico 8. Comparativo promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).	70
Gráfico 9. Promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).....	71
Gráfico 10. Desviación estándar resistencia a la compresión (MPa)	71
Gráfico 11. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)	72
Gráfico 12. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)	73
Gráfico 13. Desviación estándar módulo de elasticidad	74
Gráfico 14. Comparación coeficiente K NSR-98 – NSR 10.....	75
Gráfico 15. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico	76
Gráfico 16. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico	77
Gráfico 17. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico	78
Gráfico 18. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico	79
Gráfico 19. Penetración de Cloruros	80
Gráfico 20. Comparaciones constantes de carbonatación.	82
Gráfico 21. Promedio absorción superficial.....	84
Gráfico 22. Promedio absorción superficial.....	84
Gráfico 23. Absorción inicial vs. Tiempo según % reemplazo.....	85
Gráfico 24. Promedio absorción superficial.....	86
Gráfico 25. Índice inicial de absorción.....	87
Gráfico 26. Tasa secundaria de absorción.....	88
Gráfico 27. Promedio expansión del concreto producido por sulfatos (%).	89
Gráfico 28. Geometría Placa	101
Gráfico 29. Placa reforzada en una dirección	101
Gráfico 30. Placa reforzada en dos direcciones.....	101
Gráfico 31. Patrón de falla escogido	102

Gráfico 32. Esquema líneas de fluencia.....	103
Gráfico 33. Determinación de carga teórica.....	104
Gráfico 34. Comparación cargas teóricas (kN/m ²).....	105
Gráfico 35. Comparación cargas teóricas (kN/m ²).....	105
Gráfico 36. Cargas distribuidas máximas.....	106
Gráfico 37. Carga vs. Deformación de placas.....	107

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Cilindros reciclados y triturados	46
Fotografía 2. Trituración de cilindros	47
Fotografía 3. Agregado grueso reciclado	47
Fotografía 4. Curado de los cilindros sumergidos en agua. E.C.I.	48
Fotografía 5. Determinación módulo de finura del cemento. Permeabilímetro de Blaine..	50
Fotografía 6. Determinación densidad del cemento. Frasco de Le Chatelier	50
Fotografía 7. Ensayo resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles. ECI	54
Fotografía 8. Máquina Micro Deval . E.C.I.	54
Fotografía 9. Prensa hidráulica 200 t. Escuela Colombiana de Ingeniería.	56
Fotografía 10. Ensayo resistencia a la compresión. Cilindro fallado.....	56
Fotografía 11. Ensayo módulo de elasticidad. Laboratorio E.C.I.	56
Fotografía 12. Montaje prueba de flexión vigueta (500 x 150 x 150 mm)	57
Fotografía 13. Equipo de pulso ultrasónico E.C.I. y esquema (Mindess y Young).	58
Fotografía 14. Montaje ensayo permeabilidad a cloruros, E.C.I.....	59
Fotografía 15. Cámara de carbonatación. Escuela Colombiana de Ingeniería.....	60
Fotografía 16. Montaje ensayo tasa de absorción superficial inicial (ISAT).....	61
Fotografía 17. Montaje acorde con ASTM C 1585.....	61
Fotografía 18. Especímenes en solución de sulfato de sodio	62
Fotografía 19. Especímenes con Ettringita o sal de Candlot.....	62
Fotografía 21. Cámara de carbonatación, Escuela Colombiana de Ingeniería.....	82
Fotografía 22. Especímen carbonatado	83

PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO

Bojacá, Néstor

Resumen

El reciclaje del concreto es un asunto que se encuentra hasta ahora en una etapa preliminar de investigación en Colombia. Por ello, este estudio busca aportar elementos de juicio importantes para determinar la viabilidad del uso de agregado reciclado como alternativa en obras de construcción y motivar su fomento. Estos elementos de juicio comprenden no solo los aportes bibliográficos que a nivel mundial en la propia Colombia se encuentran sobre el tema, sino además, mediante ensayos comparativos determinar, por un lado, las propiedades mecánicas y de otra parte, la durabilidad del concreto elaborado con agregado reciclado, aspecto último que se ha abordado en muy pocas investigaciones.

Palabras clave: concreto reciclado, concreto natural, concreto convencional, agregado natural, agregado reciclado

Abstract

The concrete recycling is an issue that is so far in a preliminary stage of research in Colombia. Therefore, this study aims to provide important evidence to determine the feasibility of using alternative recycled aggregate in construction and encourage their development. Such evidence includes not only bibliographical contributions worldwide in Colombia itself are on the subject, but also by comparative tests to determine, firstly, the mechanical properties and on the other hand, the durability of concrete made with recycled aggregate, last aspect has been addressed in very few studies.

Keywords: recycled concrete, natural concrete, conventional concrete, natural aggregate, recycled aggregate

INTRODUCCIÓN

“El concreto es el segundo producto de mayor consumo en la Tierra, después del agua.”

Koji Sakai, investigador de la Universidad de Kagawa

La ingeniería civil ha realizado aportes al desarrollo de la humanidad a través de su acervo inventivo, reflejado, por un lado, en la construcción de obras generalmente monumentales para el uso institucional de los pueblos y civilizaciones, muchas de ellas de incalculable valor histórico y, por el otro, suministrando respuestas apropiadas a los deseos de confort habitacional del hombre en todos los tiempos.

En esta tarea ha debido adecuar sus proyectos a la disposición de las materias primas asequibles y los costos generales que demande el tipo de construcción deseado. En épocas pasadas estos requerimientos contaban con las limitaciones específicas dadas por la reserva de su propio entorno material y la riqueza de sus demandantes.

Con el correr del tiempo hasta fechas recientes estos factores continuaron siendo similares en alto grado hasta la época moderna, cuando, de manera más o menos imprevista, se le fue planteando a la humanidad, y con ello a toda acción del hombre, la necesidad ineludible de someter su quehacer a una manera diferente de ver el mundo, en la que se planteó la necesidad de rebajar los costos económicos de producción, al tiempo que se advertía la necesidad de limitar los desechos producidos por su acción como una forma efectiva de resolver la creciente inestabilidad ambiental del planeta, que podría amenazar el destino del hombre en la Tierra.

Si nos atenemos a lo afirmado en el acápite de esta introducción, la responsabilidad que le compete a nuestra profesión de ingenieros en esta crucial coyuntura es abismal. Abismal porque tanto los crecientes costos de la construcción como las toneladas de desechos que generamos en nuestra diversas actividades, nos hacen destinatarios importantes de las iniciativas de solución que nos ha propuesto el pensamiento actual.

Sin duda, estas directivas mundiales han tenido en otras zonas geográficas, más avanzadas que la nuestra, una receptividad oportuna que las ha puesto a la vanguardia de

los proyectos que utilizan concreto reciclado, a veces en proporciones definitivas, mientras en nuestro medio apenas hacemos los primeros pinitos investigativos en la materia.

Estados Unidos, Europa y Japón no solo tienen avanzadas conquistas en la reutilización de materiales sino que han creado industrias completas para el manejo y transformación de los residuos de construcción. En España, como se reseña en el estado de arte, se ha aprobado ya la reutilización en porcentajes importantes de agregados reciclados. En países como Bélgica y Holanda la tasa de reciclados alcanza el 95%, y en esta última, la localidad de Steenkorrel tiene la mayor planta de reciclaje de escombros y de concreto de toda Europa con una capacidad de 700 t/h. (Seminario Asogravas, 2011).

En Colombia a pesar de que existe normatividad suficiente al respecto, falta demasiado terreno por andar para poder hablar que de alguna manera caminamos en la dirección correcta en materia de reciclaje y reutilización de los desechos que deja la construcción y todas sus actividades afines. En este camino reducido sin duda ha jugado un papel importante la falta de una cultura del reciclaje, a lo que se suma la carencia notoria de investigaciones teóricas y de campo que favorezcan la reutilización práctica y eficiente de materiales reciclados en la fabricación de un tipo de concreto reciclado en construcciones estructurales nuevas.

Es por estas razones que el propósito de este proyecto consiste en no solo recopilar los resultados teóricos que la bibliografía actual nos ofrece, sino obtener resultados experimentales comparativos producto de trabajo de campo, utilizando agregados reciclados para analizar algunas propiedades físicas y mecánicas del concreto reciclado y su comportamiento a través del tiempo, es decir, su durabilidad.

La fiabilidad de los resultados obtenidos en esta investigación quizás constituya un aporte importante para impulsar la utilización de este tipo de material en las construcciones futuras, obteniéndose con ello un significativo ahorro en los costos para constructores y compradores y seguramente una solución efectiva para conservar el medio ambiente como resultado de la reutilización de materiales que reducen la pesada carga de los desechos, difícilmente degradables, que deja el sector, y lo que esto representa para el equilibrio de la Naturaleza.

Este estudio comprende como punto central, el análisis del comportamiento del agregado reciclado comparado con el agregado natural y del comportamiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto con agregado reciclado en proporciones de reemplazo del 0%, 20% y 40% para finalmente fabricar y analizar el comportamiento de cuatro losas de concreto reciclado armadas en una y dos direcciones, con porcentajes de reemplazo del 0% y 20%.

De otra parte, se recopila una serie de estudios e investigaciones de diferentes autores de diversas partes del planeta, que demuestra la importancia fundamental que ha adquirido el tema que tratamos de abordar. De su repaso queda claro que el uso de concreto reciclado en Europa y otros países desarrollados son bastante común y cuenta con regulaciones técnicas muy depuradas en las cuales recomiendan, restringen o limitan su uso, dependiendo del tipo de obra que se pretenda adelantar.

Se espera con la realización concreta de esta agenda, alcanzar todos los objetivos planteados, objetivos que finalmente brindarán un aporte a la ingeniería civil para resolver los problemas sobrevinientes que le tocan de cerca y con ello contribuir al bienestar y supervivencia del género humano.

1. JUSTIFICACIÓN

Debido a la falta de cultura del reciclaje de materiales de la construcción y de la poca investigación en Colombia que permita concebir el uso seguro del concreto reciclado utilizando agregado grueso reciclado y especialmente que trate sobre su comportamiento a través del tiempo y durabilidad, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, desde 2007, formalizó la línea de Investigación en Construcción Sostenible. Dentro de esa línea de trabajo se incluye la elaboración de concreto, utilizando diferentes materiales provenientes de residuos de la construcción, cuyo objetivo es realizar un aporte técnicamente responsable a la sociedad para entrar en una cultura del reciclaje de materiales de la construcción; por lo tanto, esta investigación propone fabricar concreto con agregado grueso reciclado para ser usado estructuralmente; además, observar su comportamiento a través del tiempo, o sea su durabilidad.

Se relacionan a continuación, algunos aspectos que contextualizan la importancia de la actual investigación en búsqueda de soluciones prácticas para mitigar los problemas que se prevén en un corto plazo:

- En 2009, con la participación de Japón, España, Suecia y Colombia (Valle de Aburrá), se llevó a cabo el Foro Internacional sobre Gestión Integral de Escombros, donde se compartieron experiencias internacionales sobre la generación y aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición. La presentación “Establecimiento de una Sociedad Consciente de los Ciclos de Materiales y el Reciclaje en Japón”, planteó como conclusión sensibilizar a la sociedad en el tema, con la responsabilidad de establecer un marco legal y un plan para generar conciencia de los ciclos de materiales.
- De acuerdo con los datos mostrados en el Seminario llevado a cabo en julio de 2011, por ASOGRAVAS, denominado, Agregados Reciclados, Mitos y Realidades, la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, UAESP, en su presentación titulada “Perspectiva de la gestión Pública para el Manejo Integral de los Escombros en el D.C. reportó que de acuerdo a un Diagnóstico Distrital de Escombros, en Bogotá D.C. no existía un manejo integral de escombros proyectándose una producción a 12 años a

una tasa de crecimiento del 4%, el estimado de escombros de 21.5 millones de m³, al año 2020.

- En la ciudad de Bogotá D.C., se expidió la Resolución No. 01115 del 26 de septiembre de 2012, por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital, se señala que dentro del marco de la gestión Integral de los Residuos de la Construcción y Demolición RCD, a partir de agosto de 2013, las entidades Públicas y Constructoras que desarrollen obras de infraestructura dentro del perímetro urbano del Distrito Capital deberán incluir desde la etapa de estudios y diseños los requerimientos técnicos con el fin de lograr la utilización de los elementos reciclados provenientes de los Centros de Tratamiento y/o aprovechamiento de RCD legalmente constituidos y/o reutilización de los generados por las etapas constructivas o desmantelamiento, en un porcentaje no inferior al 5%, del total del volumen o peso de material usado en la obra a construir por la entidad anualmente. Cada año dicho porcentaje aumentará en cinco (5) unidades porcentuales hasta alcanzar mínimo un 25%. Las entidades públicas podrán considerar como ítem de evaluación los porcentajes de material reciclado proveniente de su reutilización dentro de sus procesos de contratación pública para el desarrollo de obras.

Según reporte realizado por la Secretaría Distrital de Ambiente, a junio de 2013, ha sido masiva la inscripción realizada por las constructoras en el aplicativo web de la Secretaria de Ambiente para reciclar y reutilizar los residuos de la construcción y demolición. En total se han inscrito 60 constructoras con 90 proyectos de obras que se encuentran en construcción.

- En el Plan de Desarrollo de la ciudad de Bogotá D.C., 2012-2016, adoptado mediante Acuerdo distrital 489 de 2012, en su Capítulo III contempla el eje dos denominado “Un territorio que enfrenta el cambio climático y se ordena alrededor del agua”, en su artículo 30, Programa Basura Cero, determina como proyectos prioritarios entre otros el de Escombros cero que consiste en diseñar e implementar un modelo eficiente y sostenible de los escombros en la ciudad propendiendo por su recuperación, reincorporación al proceso constructivo de la ciudad, además de la utilización de las plantas de reciclaje.

Para lo anterior, se adoptarán mecanismos de seguimiento, control y vigilancia a los generadores de escombros para que adopten las medidas necesarias para su adecuado manejo incluida la separación en la fuente, entre las que se encuentran el plan de manejo de escombros generados como requisito para la expedición de la licencia de construcción. Para los contratos de obra pública se establecerá como causal de terminación del contrato la inadecuada disposición de los escombros.

- En el marco del Programa Basura Cero - Escombros cero del Plan de Desarrollo de Bogotá, se llevó a cabo en el mes de diciembre de 2012, el Primer Foro Distrital para la gestión y Control de los Residuos de la Construcción y demolición. En este foro se presentó por parte de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, UAESP, que actualmente la oferta de escombros está dada por entidades del sector público, sector privado y escombreras ilegales. Dentro de la entidades públicas están, el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB, METROVIVIENDA, CODENSA, la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación, Mantenimiento Vial – UAERMV y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, UAESP. Dentro de las empresa privadas están, CAMACOL y las constructoras. La disposición actual de los escombros se hace en sitios de disposición final, escombreras ilegales, plantas de tratamiento de escombros y molinos artesanales. La oferta y la demanda de los agregados de concreto en el Distrito, está dada por Cemex, Cementos Argos, Cementos HOLCIM, Obras civiles y de infraestructura y por los Depósitos de los materiales. De acuerdo con estimaciones actualizadas se proyecta para el año 2013, una producción de escombros tanto del sector público como privado de 7.3 millones de m³. Para el año 2021, se estima una producción de escombros de 10.8 millones de m³, de los cuales se pretenden recuperar 2.5 millones de m³ para 2013 y 4.8 millones para el año 2021.
- Como resultado del Primer Foro Distrital para la gestión y Control de los Residuos de la Construcción y demolición, se suscribió un Pacto para la conservación de los espacios del agua en el Distrito Capital a través del compromiso por una gestión sostenible de los residuos de construcción y demolición. Este protocolo se suscribió entre la Secretaría Distrital de Ambiente y las organizaciones representativas de la actividad económica, ambiental y de gestión de residuos de construcción y demolición RCD's en

el Distrito Capital con el objetivo de fomentar la gestión sostenible de estos residuos y proteger los espacios del agua y la estructura ecológica principal en el Distrito Capital.

Esta información permite señalar que aunque hay preocupación sobre el tema, se están proponiendo iniciativas importantes, en aras de mitigar los problemas medioambientales generados por la falta de control y aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición. Esta investigación por lo tanto, servirá como aporte en la búsqueda de alternativas para dar respuesta a la posibilidad de aprovechamiento de estos materiales, lo cual impactaría de manera positiva tanto en el medio ambiente, como en la posible reducción de costos en la construcción de obras civiles.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto en la resistencia mecánica y en la durabilidad del concreto producido por el remplazo en diferentes porcentajes del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado, mediante ensayos en probetas y en un elemento estructural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción y densidad, coeficiente de forma, desgaste en máquina de los Ángeles y micro deval.
2. Comparar el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de 20% y 40 % de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional.
3. Estudiar el efecto del reemplazo de 20 % y 40 % de agregado grueso reciclado en las siguientes propiedades relacionadas con la valoración de la durabilidad del concreto reciclado: permeabilidad a los cloruros, carbonatación, tasa de absorción superficial inicial ISAT, sortividad, y sulfatos.
4. Comparar el comportamiento de losas armadas en una y dos direcciones fabricadas tanto en concreto convencional como en concreto reciclado con el 20% de remplazo de agregado grueso.

3. ACTIVIDADES A REALIZAR

- Triturar cilindros de concreto para obtener agregado grueso reciclado
- Diseñar y elaborar tres (3) mezclas de concreto con diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado (20 % y 40 %), con una relación $A/C=0.5$, tomando como base una dosificación de concreto convencional correspondiente a 0 % de remplazo de agregado grueso reciclado.
- Realizar ensayos de laboratorio para obtener las propiedades físicas de los materiales. Cemento: densidad, finura y composición. Agregados: granulometría, masa unitaria, absorción y densidad, forma, desgaste en máquina de los Ángeles y micro deval.
- Determinar para el concreto reciclado en estado fresco el asentamiento, masa unitaria, contenido de aire y temperatura y para el mismo en estado endurecido: la resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, módulo elástico y resistencia a la flexión para edades de 7, 28, 56 y 100 días.
- Realizar algunos ensayos para valorar la durabilidad y observar el comportamiento del concreto reciclado a: cloruros, carbonatación, sulfatos, sortividad y absorción ISAT, para edades de 7, 28, 56 y 100 días
- Estudiar el comportamiento a flexión de cuatro (4) losas de concreto reciclado de dimensiones 2.0 x 0.90 x 0.03 m.

4. ESTADO DEL ARTE EN CONCRETO RECICLADO

El uso de concreto reciclado en diferentes países y especialmente en Europa es muy común, incluso algunos países tienen normas técnicas que recomiendan, restringen o limitan su uso de acuerdo con el tipo de obra. A continuación se hace una compilación de estudios e investigaciones llevados a cabo por diferentes autores, lo cual demuestra que el interés por el tema es de suma importancia:

BARRA M. (1996), en su estudio de durabilidad del concreto con agregado reciclado aplicado como concreto armado, encontró los siguientes resultados: La utilización de agregados reciclados procedentes mayoritariamente de concreto puede quedar limitada frente a los convencionales debido a la mayor absorción que presenta. El consumo de cemento, para obtener la resistencia a compresión respecto a un concreto dosificado con agregados convencionales, aumenta entre un 7.2% para resistencias a compresión más bajas y un 17.3% para las más altas. La mayor porosidad del agregado reciclado influye negativamente en la carbonatación del concreto. El módulo elástico en los concretos reciclados estudiados es un 20% inferior a los de control.

GÓMEZ J., et ál. (1999), en su trabajo *Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto*, presentan el análisis experimental de especímenes de concreto reciclado donde se reemplazaron agregados naturales por agregados reciclados de concreto. Analizaron las propiedades de los agregados empleados, así como las propiedades del concreto reciclado como compresión simple, tensión indirecta, módulo de elasticidad, contracción y fluencia (básicas y por secado). Los especímenes de prueba contemplaron reemplazos del 0%, 15%, 30%, 60% y 100% de agregado reciclado de concreto respecto del contenido total de agregados gruesos por volumen. Además concluyeron que 1. Los agregados reciclados procedentes de concreto presentan un elevado nivel de poros, con posibilidad de absorber más agua y una densidad más baja que los agregados de uso acostumbrado. 2. Las variaciones que se puedan presentar entre las propiedades de los diferentes agregados reciclados de concreto son una función del tipo de concreto original, su estado de conservación y por último del proceso de producción del cual son creados. 3. Los resultados de las propiedades mecánicas estáticas de concretos reciclados apuntan a una reducción en sus cuantías; dichas reducciones son proporcionales

y producidas por el incremento de reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados procedentes del concreto. 4. Al parecer, el porcentaje de agregado natural sustituido del orden de 0.30, en los concretos reciclados, marca la frontera entre el proceder de éstos y de un concreto normal. 5. La evolución en el tiempo de las propiedades mecánicas de concretos reciclados es parecida a los concretos convencionales; sin embargo, la resistencia a tensión indirecta es menor que la del concreto con agregado natural. 6. Los incrementos en los valores de fluencia y contracción para los concretos reciclados deben ser explicados sobre la base de las propiedades de los agregados reciclados procedentes del concreto. 7. Se resalta la importancia que tienen en el comportamiento de los concretos reciclados, la cantidad y calidad de la pasta de los agregados reciclados de concreto. 8. Los anteriores puntos ponen de manifiesto la importancia que tienen en el comportamiento de los concretos reciclados la cantidad y calidad de pasta de que constituyan los agregados reciclados de concreto. 9. La viabilidad de la fabricación de elementos estructurales de concreto reciclado deberá tomar en cuenta los parámetros y coeficientes adecuados al comportamiento de estos concretos.

HERNÁNDEZ C. et ál. (2005) analizaron las ventajas y limitaciones de concretos elaborados con agregado grueso reciclado, el cual puede ser un material alternativamente viable en la industria; para esto, elaboraron concretos con diferentes contenidos unitarios de material cementicio (CUMC), con 100% de reemplazo del agregado grueso por agregado reciclado, con ellos evaluaron tanto las características en estado fresco (asentamiento contenido de aire, peso de la unidad de volumen), como en estado endurecido (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático y dinámico, succión capilar, penetración de agua, permeabilidad a los cloruros y la velocidad de pulso ultrasónico). Concluyeron que los agregados reciclados comparados con los naturales presentan diferencias en cuanto a sus características. Los métodos de ensayo indicados en la norma técnica IRAM1531, fueron aplicables a este tipo de material, lo cual permitiría la inclusión del agregado reciclado en las normas y reglamentos. El reemplazo total de agregado grueso natural por reciclado, es técnicamente factible. La demanda de agua de los concretos reciclados fue levemente mayor al concreto de referencia; entre tanto, la resistencia a la compresión fue levemente menor al de referencia. La deformación del concreto reciclado es mayor que el concreto natural. El módulo de elasticidad para el concreto reciclado tuvo una disminución

entre el 25% y el 30%, para edades de 7 y 28 días respectivamente. En cuanto a la durabilidad, el concreto reciclado es más poroso y por ende, más susceptible a ser atacado por los agentes ambientales por ser menos resistente a factores externos.

SÁNCHEZ ALAEJOS (2004), en su trabajo Aspectos Químicos del Árido Reciclado Relacionados con la Durabilidad del Concreto, evaluaron las propiedades químicas de los agregados reciclados procedentes de concreto con el fin de estudiar su influencia en posibles procesos de degradación del concreto. Para ello, realizaron el control de producción en una planta de reciclado de escombros, evaluando propiedades químicas como: el contenido de cloruros, contenido de sulfatos, compuestos totales de azufre y contenido de álcalis. Los resultados demostraron que en general los áridos reciclados pueden satisfacer las especificaciones que establece la EHE (Instrucción Española del Hormigón Estructural), relativas a los contenidos de cloruros y sulfatos, aunque suelen presentar elevados contenidos de álcalis. Sus conclusiones principales fueron: El análisis químico de las distintas muestras indica que el árido reciclado ensayado, no presenta problemas en cuanto al contenido de cloruros y sulfatos. En el caso de los agregados reciclados, puede resultar poco segura la determinación de los cloruros solubles ya que aunque estos son los que pueden inicialmente atacar las armaduras, determinadas condiciones como la presencia de iones sulfatos, pueden provocar la liberación de cloruros no solubles. Desde un punto de vista más conservador, conviene controlar el contenido de cloruros totales en estos áridos. En cuanto al contenido de sulfatos, el árido reciclado ensayado cumple las limitaciones que establece la EHE (Instrucción Española del Hormigón Estructural), tanto para el contenido de sulfatos solubles en ácido (0.8%), como para el contenido de compuestos totales de azufre (1.0%), presentando valores máximos de 0.42% y 0.58%, respectivamente. Los áridos reciclados presentan un elevado contenido de álcalis, con un porcentaje de óxido de sodio equivalente ($0.658K_2O + Na_2O$) que oscila entre el 1% y 2%. Por ello, para su utilización en ambientes diferentes a la exposición ambiente no agresivo y exposición ambiente normal-humedad media, se recomienda utilizar una única fuente controlada y realizar un estudio complementario de reactividad potencial, tanto del propio árido reciclado, como del árido natural que se utilice en la mezcla.

En su trabajo “Estudios sobre Hormigón Reciclado con Áridos”, RAKSHVIR et ál. (2006), hace una compilación importante de estudios e investigaciones:

- AJDUKIEWICZ Y KLISZCZEWICZ (2002), reportaron que las propiedades del concreto origen utilizado como agregado reciclado, influye en las propiedades mecánicas del concreto reciclado obtenido y que es posible obtener concreto reciclado de una mayor resistencia a la compresión que el concreto original. El diseño de mezcla del concreto reciclado, que consideran es similar a los procedimientos de elaboración de concreto con agregados naturales. Resaltan la necesidad de hacer correcciones respecto del contenido de agua con el objeto de obtener la trabajabilidad adecuada.
- POON et ál. (2002), en su estudio, utilizaron áridos reciclados provenientes de residuos de la construcción y la demolición (C&D) obtenidos de dos áreas públicas de relleno. Se variaron las mezclas mediante el reemplazo de áridos naturales gruesos y finos por áridos reciclados hasta 100% por peso, con la incorporación de cenizas volátiles y sin dichas cenizas. Los resultados de las pruebas demostraron que el reemplazo de áridos naturales gruesos y finos por áridos reciclados en niveles de 25 y 50% provocan un efecto minúsculo sobre la resistencia a la compresión de ladrillos y bloques. Sin embargo, niveles de reemplazo mayores reducen la resistencia a la compresión.
- OLORUNSOGO Y PADAYACHEE (2002), estudiaron los índices de durabilidad tales como la conductividad del cloruro, la permeabilidad del oxígeno y la capacidad de absorción de agua en tres mezclas de concreto con porcentajes de agregado reciclado del 0%, 50% y 100%, controlados a los 3, 7, 28 y 56 días. Informaron que en términos generales, la calidad de la durabilidad del concreto con agregado reciclado se redujo con el aumento de la cantidad de agregado reciclado que se incluyera en una mezcla, y que la calidad mejoró con el tiempo de curado. La disminución de la calidad en la durabilidad del concreto se explica por la presencia de grietas y fisuras producidas en los agregados reciclados durante su procesamiento, lo cual revela que los agregados con el tiempo son susceptibles de facilitar la permeación, la difusión y la absorción de fluidos.
- CHEN et ál. (2002) informaron que los escombros de la construcción podían transformarse en áridos reciclados útiles a través de un procesamiento adecuado. Los áridos reciclados también contenían ladrillos y, en menor medida, baldosas o azulejos. Los resultados de las pruebas demostraron que la resistencia a la compresión del

hormigón elaborado con áridos reciclados gruesos con partículas de ladrillos y baldosas o azulejos alcanzó alrededor del 75% - 80% de la resistencia del concreto común. La resistencia a la flexión fue del 78% al 91% de la resistencia del concreto común. El módulo de elasticidad para el concreto reciclado fue de alrededor del 70% del módulo de concreto común y el cambio de la relación agua/cemento o el contenido de ladrillos y baldosas o azulejos no produjo un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad.

- TOPCU (1997), estudió muestras de concreto mezclados con porcentajes variables de residuos de concreto. Observó la disminución del asentamiento así como la dureza de la superficie del concreto a medida que se incrementó el contenido de residuos de concreto. El valor de la dureza Schmidt de 21.3 para agregado común se redujo a 11.6 en los residuos de concreto, lo cual muestra que también se produce una disminución de la resistencia del concreto. Las pruebas de velocidad de ultrasonido mostraron que a medida que se incrementaba la cantidad de residuos de agregados de concreto, la velocidad de pulso ultrasónico se reducía ya que los espacios vacíos o poros se agrandaron, por lo tanto, la resistencia del concreto disminuyó. Las pruebas de resistencia a la compresión mostraron una disminución con el aumento de contenido de residuos de agregados de concreto, especialmente cuando la relación fue mayor al 50%. En las pruebas de impacto, la profundidad del daño fue mayor en concreto con agregados provenientes de residuos; la razón más importante fue que la pasta de cemento con escombros y desechos es frágil, lo cual afecta la resistencia al impacto del concreto.
- TOPCU Y GUNCAN (1995), obtuvieron materiales de desecho provenientes de edificaciones demolidas los que fueron limpiados y reducidos al estado de agregados. La densidad del concreto elaborado con agregados de concreto de desecho mostró valores distintos en las propiedades respecto al concreto con agregado natural. La trabajabilidad fue baja debido a la gran absorción de agua de los agregados de concreto de desecho. A medida que se incrementó la proporción de agregados reciclados de concreto, la resistencia a la compresión se redujo y fue menor a la esperada, el módulo de elasticidad fue de alrededor de 80% del valor esperado. Observaron que con el aumento de los agregados reciclados de concreto en la mezcla disminuyeron los valores de rigidez, capacidad de energía plástica y de capacidad de energía elástica.

- BARRA DE OLIVEIRA Y VÁZQUEZ (1996), estudiaron los efectos en tres condiciones de humedad diferentes de los áridos reciclados: secos, semisaturados y saturados. Informaron que los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas se ajustaban a la información suministrada por la literatura existente. Sin embargo, observaron una leve disminución de la resistencia del concreto elaborado con agregados reciclados secos y saturados. Esa disminución fue mayor en la resistencia a la flexión.
- NAGATAKI *et ál.* (2000), estudiaron tres tipos de concreto aireado producido en laboratorio de un año de antigüedad con relaciones A/C, baja, media y alta, y un concreto no aireado de 28 días, con una relación A/C media. Posteriormente, estos concreto fueron triturados y se reciclaron para fabricar diferentes concretos. Las propiedades físicas del agregado grueso reciclado mostraron una relación entre la gravedad específica y la absorción del agua (a mayor absorción de agua menor gravedad específica de los agregados). Los ensayos sobre los tipos de concreto fabricados con agregados reciclados aireados de calidad media y alta arrojaron valores de resistencia de 3% a 16% mayores comparadas con la resistencia del concreto original. Sucedió lo contrario cuando se fabricó concreto utilizando fracciones finas como gruesas de agregado reciclado de baja calidad, la resistencia a la compresión se redujo un 6% y la porosidad se incrementó un 11%, esto comparado con la resistencia de referencia y el volumen de porosidad. Los autores hacen referencia que la reducción del contenido de mortero adherido aumenta el rendimiento físico del concreto mediante la reducción de la porosidad, la absorción de agua y el grado de acción capilar. Concluyeron que la estructura del mortero adherido es un indicador de calidad importante de los agregados reciclados que afecta directamente el rendimiento del concreto reciclado, y si los agregados reciclados no se originan en un concreto de muy baja calidad, la resistencia a la compresión del concreto reciclado con una A/C de 0.55 puede ser mayor que la resistencia del concreto original.
- TORBEN Y NARUD (1983), realizaron estudios en los cuales produjeron concreto de grava natural de alta, mediana y baja resistencia, mediante la variación de la relación agua/cemento y el mantenimiento de los otros factores en un estado básicamente

idéntico. Los autores informaron que en comparación con la grava natural, los agregados reciclados poseen una densidad menor, una mayor absorción de agua, un porcentaje mayor de pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles y una mayor relación entre el porcentaje de pérdida en la máquinas de los Ángeles y el valor de trituración de áridos. El porcentaje de mortero que permanece adherido a las partículas de grava natural en los agregados reciclados varía aproximadamente 30% en fracciones de 16-32 mm, hasta más de 60% en fracciones de 4-8 mm. Los autores estimaron que es probable que cantidades tan grandes de mortero en agregados reciclados, afecten las propiedades de deformación de los concretos reciclados.

MAJOR RAKSHVIR, SUDHIRKUMAR V. BARAI (2006), enfocaron su trabajo en un programa experimental consistente en el estudio de los siguientes aspectos, las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados, las propiedades de endurecimiento del concreto reciclado con agregados y el comportamiento a la fatiga del concreto con agregados reciclados en flexión.

Para estudiar las propiedades de los agregados reciclados, seleccionaron tres tipos de materiales. Grupo I, material obtenido de muestras que se habían utilizado en laboratorio en menos de un año, la trituración fue manual utilizando martillo y se realizó en laboratorio. Grupo II, material obtenido de una losa con antigüedad de un año procedente de un edificio demolido; no se le retiró el mortero adherido. Grupo III, material obtenido de la demolición de un edificio de más de 30 años de antigüedad; no le retiró el mortero adherido. Es importante señalar que solo utilizaron agregado grueso para los estudios realizados. Posteriormente, fabricaron el concreto con estos agregados; las variables importantes fueron: las mezclas se diseñaron para resistencia de 20 MPa a 28 días, la relación A/C = 0.5, el agregado fino fue arena natural de río y el agregado grueso fue material reciclado, las muestras se curaron en agua 28 días. Realizaron ensayos a la compresión a 3, 7 y 28 días y para ello fabricaron cubos de 150 mm x 150 mm x 150 mm, y cilindros de 150 mm de diámetro. Para determinar la resistencia a la flexión elaboraron prismas de 100 mm x 100 mm x 500 mm. Los reemplazos de agregado grueso reciclado fueron del 0%, 25% y 50%.

Algunas de sus conclusiones fueron: el diseño de la mezcla del concreto reciclado fue similar a la del concreto elaborado con agregados naturales. Realizaron correcciones en el

contenido de agua para obtener una manejabilidad adecuada y para compensar la mayor absorción de agua de los agregados reciclados. La resistencia a la compresión disminuyó a medida que aumentaba la cantidad de agregados reciclados; la variación estuvo entre 5% y 15%, variación explicada por el aumento del contenido de agregados reciclados, lo cual provocó un aumento de los poros y, por lo tanto, causó la pérdida de resistencia. Se observaron valores similares de las pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la rotura por tracción para los tres tipos de materiales. Los valores del módulo de elasticidad que se obtuvieron para el concreto elaborado con el 25% de agregado reciclado fueron menores que los obtenidos para el concreto elaborado con agregados convencionales. La prueba de fatiga demostró que las muestras elaboradas con distintos tipos de agregados reciclados alcanzaban una menor cantidad de ciclos antes de quebrarse, en comparación con las muestras elaboradas con el 100% de agregados naturales.

MARTÍNEZ I, et ál. (2006), en su trabajo Comportamiento Mecánico de Concreto Fabricado con Agregados Reciclados, presentó el desempeño de concretos fabricados con agregados reciclados obtenidos a partir de cilindros de concreto premezclados y diferentes consumos de cemento. Concluyó que el reciclaje del concreto para fabricar agregado reciclado y sustituir al natural es una práctica que debe empezar rápidamente dado la escasez de materiales pétreos; el agregado reciclado con granulometría adecuada produce mezclas de concreto de buena calidad con un comportamiento mecánico similar al de los concretos naturales. En las resistencias a tensión y flexión encontró que para consumos de cemento de 300 kg/m^3 y mayores, las relaciones $f_t/\sqrt{f'_c}$ y $MR/\sqrt{f'_c}$ fueron menores para los concretos reciclados, posiblemente porque a bajas relaciones agua/cemento domina el comportamiento del agregado grueso y a altas relaciones agua/cemento domina el de la pasta, lo cual permite pensar que el agregado reciclado tiene mejor aplicación en volúmenes cemento hasta 300 kg/m^3 , debido a que para consumos mayores podrían resultar mezclas antieconómicas.

EVANGELISTA, L; DE BRITO, J. (2007), en su investigación Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregado fino de concreto, manifiestan que los residuos de la demolición de concreto son una fuente de agregados para la nueva producción de concreto. Adicionalmente mencionan que varios estudios han mostrado que el concreto con agregado grueso reciclado tiene propiedades similares a las del concreto convencional, incluso en

concreto de alta resistencia, impactando esto, de manera positiva en el medio ambiente. No obstante, el remplazo de agregado fino está limitado por los varios códigos ya que se cree que su mayor absorción van en deterioro de la propiedades del concreto. La investigación consistió en obtener agregado fino reciclado en laboratorio de concreto cuyos resultados obtenidos contradicen la percepción señalada anteriormente. El agregado fino reciclado lo obtuvieron de concreto convencional (OC) en condiciones controladas de laboratorio para controlar variables que no afectaran los resultados. El concreto tuvo a los 28 días una resistencia a la compresión de 29.6 MPa, el cual fue triturado en el día 35 obteniéndose un tamaño máximo nominal de 38.1 mm. El agregado fino natural (FNA) y el agregado fino reciclado (FRA), fueron separados según su tamaño, por tamizado mecánico entre fracciones de 0,074 y 1,19 mm. Dado que las curvas granulométricas entre estos agregados tenían diferencias, se hizo ajuste en el agregado fino reciclado con el objetivo de tener una misma distribución de tamaños. El FRA, presentó una baja densidad comparada con FNA, debido a su porosidad y por ende se traduce en mayor absorción de agua.

El diseño de la mezcla utilizado fue el método de Faury. La parte experimental se realizó en tres etapas: en la primera se estudiaron y probaron diferentes composiciones de concreto con el objetivo de ajustar las proporciones de la mezcla, el objetivo de la segunda etapa fue realizar una evaluación preliminar de las mezclas de concreto, con base en parámetros tanto mecánicos (resistencia a la compresión y contracción) y relacionados con la durabilidad (absorción de agua); el propósito fundamental de la tercera etapa fue evaluar, de manera detallada, las mezclas que presentaron los resultados más prometedores en la segunda etapa. Se utilizaron dos técnicas diferentes para la mezcla de los agregados finos (tanto natural y reciclado) con agua. La primera técnica, aplicada a la primera etapa, los agregados finos se sumergieron en agua ($\frac{2}{3}$ del agua de mezcla requerida, más el agua que se estimó para ser absorbido), y se mezclaron durante un período de 10 minutos, posteriormente se introdujeron los componentes restantes. La segunda técnica, se utilizó en la segunda y tercera etapa usando el mismo procedimiento de mezcla, excepto que la duración de la mezcla se extendió a 20 minutos. Se esperaba que la sustitución de FNA con el FRA causaría un gran aumento en la relación A/C. Con el fin de mantenerlo a un nivel aceptable (por debajo de 0,45, ya que, para una tasa de remplazo del 100 %, la literatura existente prevé un gran aumento en el contenido de agua necesaria para mantener la viabilidad de la constante de la mezcla), se utilizó un superplastificante a base

de carboxilato, 1.3 % en peso de cemento (CEM I 42,5 R Portland, 380 kg/m³), y tres de piedra caliza triturada agregados gruesos diferentes. Los resultados experimentales que reportaron indican que es viable fabricar concreto estructural con agregado fino reciclado en remplazos parciales o globales. Lo anterior, fundamentado en: la resistencia a la compresión no se vio afectada por el porcentaje de reemplazo, por lo menos hasta un 30%. La tensión a la tracción como el módulo de elasticidad se redujo con el aumento de la tasa de sustitución, sin embargo, los valores obtenidos para las propiedades aceptables, especialmente tasa de sustitución del 30 %. La resistencia a la abrasión parece aumentar el porcentaje de sustitución del agregado fino natural por el agregado fino reciclado, señalando que este último se obtuvo de mezclas de concreto especialmente producidas en el laboratorio, lo que llevó al control de trituración y tamizado de los agregados reciclados . Se espera que el agregado fino reciclado obtenido a partir de estructuras sobre el terreno probablemente tendría partículas de suciedad que podrían reducir su rendimiento, aspecto que se evitaría si se extrae con el cuidado debido a partir de elementos prefabricados de concreto.

ROLÓN J, et ál. (2007), en su investigación Caracterización del Concreto elaborado con Áridos Reciclados Producto de la Demolición de Estructuras de Concreto, buscaron caracterizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados reciclados, producto de residuos de la construcción y demolición de estructuras de concreto, tratándolos antes y después de triturar (prelavado para eliminar contaminantes, triturado y lavado posterior para eliminar los finos); caracterizar el concreto fabricado con agregado reciclado en estado fresco y endurecido con diferentes dosificaciones variando la relación agua/cemento, la cantidad de cemento y el uso de aditivos superplastificantes para reducir el efecto de la absorción. Concluyeron que el agregado reciclado de la demolición de pavimentos de concreto tiene ciertas desventajas físicas y mecánicas debido a la composición de dos materiales (agregado natural y mortero adherido) que da como resultado un nuevo material con características diferentes y con desventajas mecánicas como la porosidad, absorción, baja densidad y una baja aceptable en la resistencia a la compresión.

TONDA et ál. (2009), en su trabajo, Reciclado de Hormigón sin Preselección en Origen, tuvo como objetivo mostrar los resultados de ensayos de laboratorio practicados sobre

concretos, conformados por la combinación de agregados naturales con agregados reciclados, estos últimos provenientes de la trituración de residuos de concretos llevados al relleno sanitario municipal, los cuales tienen procedencia y calidades diversas, no preseleccionadas. Elaboraron concretos con el 25 %, 50 % y 75 % de agregados reciclados en reemplazo de agregados naturales y un concreto patrón de comparación. Los resultados evidenciaron la factibilidad del aprovechamiento de tales agregados con fines estructurales sustentados en las siguientes conclusiones: Comprobaron que es posible aprovechar para uso estructural los concretos recuperados de demoliciones, ratificando experiencias similares de otros investigadores. Los valores de resistencia alcanzados fueron significativos y cumplieron los requerimientos habituales para obras de uso corriente como edificios y pavimentos. Los ensayos realizados no contemplaron aspectos vinculados a la durabilidad, tales como contenido de sustancias nocivas de los agregados, permeabilidad al ion cloruro, penetración del agua a presión o absorción del concreto endurecido, por lo que recomendaron el estudio para uso con fines estructurales ya que la mayor porosidad de los agregados reciclados afectan la durabilidad del concreto. Adicionalmente, resaltan la posibilidad del uso del agregado reciclado anotando las ventajas medioambientales y socioeconómicas.

EVANGELISTA, L; DE BRITO, J. (2010), en su investigación Desempeño en la Durabilidad del concreto elaborado con agregado fino de concreto reciclado, manifiestan que los agregados finos reciclados son observados como la última opción para la producción de concreto, dado que muchas referencias mencionan su influencia perjudicial sobre las características más importantes de concreto como la resistencia a la compresión y a la tracción, módulo de elasticidad, absorción de agua, contracción, carbonatación y penetración de cloruros. Estas dos últimas características importantes para valorar la durabilidad a largo plazo del concreto. En la investigación experimental llevada a cabo en el Instituto Superior Técnico, IST (Lisboa, Portugal), muestran los resultados de la absorción de agua por inmersión y la capilaridad, la penetración de cloruros (mediante el coeficiente de la migración de cloruro), y resistencia a la carbonatación. Mencionan que la evaluación del rendimiento de una mezcla de concreto no se limita a la determinación de sus propiedades mecánicas, ya que es muy importante caracterizar el material en términos de los parámetros que clasifican su durabilidad.

La vida útil de una estructura de concreto están relacionadas con las propiedades que definen la durabilidad, que incluyen entre otros, la permeabilidad (a varios agentes), la reactividad álcali-sílice, la reacción a los ciclos de formación de hielo - deshielo, la reacción a los sulfatos. El concreto con agregados reciclado ya no es más un campo de investigación, sino una práctica real, hasta tal punto que varios países están elaborando documentos normativos para regular su uso. En la mayoría de los códigos limitan o prohíben incluso el uso de agregado fino reciclado. Se relacionan a continuación los diferentes aspectos que se llevaron a cabo en el programa experimental que adelantaron: los agregados finos reciclados se obtuvieron mediante la trituración del concreto original (CO) producido en el laboratorio utilizando una trituradora de impacto. El material resultante se compuso de agregados cuyo tamaño varió de 0 a 38.1 mm, se utilizaron los tamaños de las fracciones hasta 1.19 mm. Los agregados reciclados presentaron densidades inferiores comparadas con los agregados naturales debido a su mayor porosidad, lo que resulta en una mayor absorción de agua. Los concretos tuvieron un porcentaje de remplazo del 30 % y 100 % y el concreto de referencia (RC) producido con agregados naturales, estudiaron de acuerdo con la metodología propuesta por Faury, con la trabajabilidad (medida por el cono de Abrams) como una característica común, dentro del intervalo de 80 ± 10 mm . Se utilizaron tres agregados naturales gruesos (CA), todos ellos de piedra caliza triturada. El cemento utilizado fue CEM I 42.55 R con un contenido de 380 kg/m³ y esta se mantuvo constante en todas las mezclas. Se utilizó también un superplastificante de carboxilatos. El contenido fue 1.3 % en peso de cemento, que también se mantuvo constante en las otras mezclas. La resistencia a la compresión presenta poca o ninguna variación, incluso para concreto con tasa de remplazo del 100 %, la reducción máxima del módulo de elasticidad fue de 18,5 %. La reducción máxima de resistencia a la tracción y resistencia a la abrasión fue aproximadamente 30 %.

Para la determinación de la absorción de agua por inmersión se utilizaron los procedimientos establecidos por el Laboratorio Nacional Portugués de Ingeniería Civil (LNEC) E394 estándar, utilizando especímenes cúbicos 0.10 m. La prueba de penetración de cloruros la realizaron de acuerdo con el método Nordtest, con una modificada: la entrada a la celda se hizo acorde con la norma ASTM C1202. La resistencia a la carbonatación se midió en un estado acelerado, con muestras en una cámara de carbonatación con la concentración de 5 % de CO₂, siguiendo las recomendaciones de RILEM CPC- 18.

Concluyeron los siguientes aspectos: La absorción de agua por inmersión aumenta con la tasa de sustitución de los agregados finos naturales (FNA) por agregados finos reciclado (FRA), hasta un máximo del 46% para el concreto elaborado exclusivamente de FRA, en comparación con un concreto de referencia utilizando sólo FNA. El agregado fino reciclado tiene un efecto más perjudicial sobre la resistencia a la absorción de agua por capilaridad que en la absorción de agua por inmersión, y el coeficiente de capacidad de absorción tiene un incremento relativo del 70.3 % para el concreto hecho con 100% de FRA en comparación con el concreto de referencia. En ambos casos, parece que aumenta la absorción de agua linealmente con la tasa de reemplazo, ya que FRA tiene una estructura más porosa, que se extiende a la matriz de concreto. Los coeficientes de migración de cloruro se incrementan linealmente con el porcentaje de sustitución de los agregados finos, alcanzando, para el presente caso, un aumento del 34% para el concreto con el reemplazo total de la FNA en comparación con el concreto de referencia sin FRA. La resistencia a la carbonatación se reduce con la adición de FRA en el concreto; la profundidad de penetración de CO₂ aumentó alrededor de un 40 % para el concreto hecho con 30 % de FRA y alrededor de 110 % para el concreto hecho exclusivamente con FRA. Para una mayor durabilidad el reemplazo total de la FNA por FRA en una mezcla de concreto pueden presentar algunas dificultades serias, sin embargo, para porcentajes de sustitución más pequeñas (por ejemplo, 30 %), el uso de FRA para la producción de concreto estructural es factible, en contra de la noción generalizada (incluso en códigos). Finalmente, teniendo en cuenta el comportamiento mecánico aceptable de estos materiales y el hecho de que algunas estructuras no se ven afectados por problemas de durabilidad (por ejemplo, elementos de concreto protegido de agentes agresivos naturales), concreto FRA puede ser una fuente útil de material para la producción de concreto y podría potencialmente reemplazar FNA en algunas mezclas de concreto.

THOMAS, C., et ál. (2011), valoraron la influencia que supone la utilización de agregados reciclados en el comportamiento a la fatiga de concretos elaborados con estos. Realizaron sustitución de agregado grueso del 0%, 20%, 50% y 100%, esto con el objetivo de proponer un grado de sustitución óptimo al momento de diseñar concretos con aplicación estructural. Experimentalmente utilizaron la técnica propuesta por Locati. De acuerdo con los resultados obtenidos, observaron una mejora en las resistencias a la compresión y al módulo elástico dinámico de los concretos con mayor grado de sustitución. De acuerdo con la determinación

de las energías disipadas y almacenadas, encontraron que para los concretos reciclados con sustitución total de agregado reciclado, la rigidez se vio reducida y la resistencia frente a cargas cíclicas aumentó.

RODRÍGUEZ S. (2011), En su trabajo El uso de agregados reciclados en España, menciona que en 2006 cada español consumía 11650 kg de agregados al año (150 veces su peso). El transporte de agregado a más de 40 kilómetros hacía que el transporte fuera más costoso que el agregado, por eso las canteras deberían estar cerca del centro de consumo. Para construir una vivienda unifamiliar eran necesarias 400 toneladas de agregados, entre tanto, para un colegio o un hospital se necesitaría 15000 toneladas y para un kilómetro de autopista 30000 toneladas. La EHE (Instrucción Española del Hormigón Estructural), contempla para la fabricación de concreto estructural con agregados reciclados, solo del 20% de reemplazo; para concreto reciclado no estructural se permite el 100% de agregado reciclado.

VELANDIA D. (2011), en su exposición sobre el impacto de la reutilización del concreto como agregado reciclado, revisó algunos mitos que se tienen sobre el uso de los agregados reciclados. Señala que las propiedades del agregado reciclado de concreto como la porosidad, absorción y granulometría no son impedimento para ser utilizado en la fabricación de concreto reciclado con el que se han obtenido altas resistencias. Países como Estados Unidos, Inglaterra, Australia y Alemania lo usan en la fabricación de concretos estructurales, ejemplo en la construcción, el Aeropuerto Internacional O'Hare en Chicago. Desde el punto de vista económico, la utilización del agregado reciclado puede ser competitiva dependiendo entre otros factores de los incentivos gubernamentales y normatividad que exija su uso. Finalmente, muestra los resultados que se han obtenido en ARGOS con la fabricación de concretos con agregado reciclado en porcentajes de sustitución del 0%, 10%, 20% y el 30%, observando que en todos los casos se superó en más del 50%, la resistencia esperada.

La Unión Europea de Productores de Áridos, UEPG, la cual tiene miembros en 31 países, en su informe bianual 2010-2011, reportó que la demanda de agregados en Europa es de 3.000 millones de toneladas generando un negocio de 20000 millones de euros. La demanda de agregados es de 5.5 toneladas per cápita. El 90% de los agregados producidos

de recursos naturales, el restante 10% corresponde a 6% de agregados reciclados, el 2% agregado marino y el 2% de agregados elaborados. Se describe además, la cantidad de agregado necesario para ciertos tipos de construcciones: casa nueva 400 t, escuela nueva 3.000 t, estadio deportivo 300.000 t, y un kilómetro de autopista 9.000 t. Cada una de estas construcciones requiere el cumplimiento de especificaciones técnicas para los agregados, tales como, la forma, durabilidad, abrasión, resistencia al hielo y deshielo.

Según datos de la Iniciativa para el Cemento Sustentable publicados en la revista *Obras de México (2010)*, en el mundo al año se generan 900 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición; los países que mayor cantidad de concreto desechan son: Estados Unidos, Japón y algunos países de Europa. En países europeos la producción de residuos de la construcción son del orden de 1.0 kg/hab/día y en ciudades muy pobladas puede ascender a 1.5 kg/hab/día (SERRANO, G. 2009). No obstante lo anterior, algunos países europeos prevén en sus normatividades, la obligación de introducir un porcentaje de material reciclado en las obras de construcción y se cuenta con plantas de reciclaje, legislación y trabajo en laboratorio sobre el tema, lo que ha contribuido a aclarar la concepción que se tiene sobre los materiales reutilizables, dado que la cultura del reciclaje ha estado poco arraigada en la sociedad.

"El concreto es el segundo producto de mayor consumo en la Tierra, después del agua", comentó a la revista *Obras* el doctor Koji Sakai investigador de la Universidad de Kagawa en Japón, señalando que el Reino Unido es el país que utiliza más concreto reciclado. La mayor parte de ese material se usa para infraestructura, como la construcción de los recintos para los Juegos Olímpicos de Londres en 2012. Otro país que le da uso a sus materiales de residuo es Japón. La nación asiática fabrica concreto con los desperdicios de la construcción de su red vial. En Estados Unidos, Alemania, Australia, Bélgica, Holanda y los Emiratos Árabes Unidos también se aplican técnicas de recuperación de desperdicios de construcción (Revista *Obras*, México, 2010).

Por su parte en Colombia, a través de la academia, instituciones de educación superior están brindando sus aportes en investigación y búsqueda de alternativas seguras y posiblemente más económicas que permitan contribuir a la sostenibilidad del medio

ambiente. Tal es el caso de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que dentro de sus líneas de investigación en la Especialización en Estructuras y la Maestría de Ingeniería Civil se han adelantado investigaciones en el tema de reciclaje de escombros y residuos de construcción, encontrando resultados que dan los primeros pasos para considerar la utilización de productos elaborados con este tipo de elementos. Las experiencias llevadas a cabo son:

BOJACA N. (2008), en su trabajo de grado titulado Concreto Sostenible como Alternativa Estructural, Ambiental y Económica en la Construcción de Obras Civiles, trazó como objetivos de su estudio los siguientes aspectos: Revisar estudios y experiencias a nivel mundial, nacional y distrital, enfocados a la utilización de material producto del reciclaje del concreto; Analizar la normatividad nacional y distrital, encaminada a la disposición de material residual, producto de la construcción (escombros); Sensibilizar sobre la necesidad de uso y garantías que ofrece el concreto reciclado, como una alternativa ambiental y técnicamente segura en la construcción de obras civiles; Determinar los volúmenes de escombros generados en la ciudad de Bogotá, D.C., y que puedan ser utilizados para la obtención de concreto reciclado y comprobar mediante ensayos de laboratorio las propiedades físicas y mecánicas de los materiales y del concreto fabricado con agregados reciclados.

Para la fase experimental, el agregado grueso reciclado provino de cilindros de concreto almacenados en un laboratorio de materiales, a los cuales se les conocía su resistencia a la compresión, por lo tanto, los cilindros se clasificaron en dos grupos, un grupo de cilindros con resistencia a la compresión entre 18 y 25 MPa y otro grupo con resistencias entre 25 y 32 MPa, esto con el fin de observar la incidencia de la resistencia a la compresión del material origen. El porcentaje de reemplazo del agregado grueso fue del 100%, se utilizó agregado fino natural. Las relaciones A/C fueron de 0.5 y 0.6. Se realizaron dos diseños de mezclas, una para el agregado grueso reciclado entre 18 y 25 MPa, para una relación A/C=0.6, y la otra para el agregado reciclado entre 25 y 32 MPa, para una relación A/C=0.4. Cada uno de los diseños de las mezclas realizadas se elaboró para un asentamiento de 5 cm. Para el cálculo de la cantidad de agua, contenido de aire de la mezcla y el asentamiento referido, se utilizaron las gráficas existentes para el diseño de concreto convencional. Se fundieron cilindros de concreto de 100 mm x 200 mm y viguetas de 150 x 150 x 500 mm. El

curado de los especímenes fue en piscina de agua. Las edades de ensayo fueron de 7 y 28 días. De esta investigación, las conclusiones obtenidas fueron las siguientes: La manejabilidad del concreto fabricado con el agregado grueso reciclado tiende a ser mucho menor que la del concreto convencional, debido al nivel de absorción del agregado reciclado, por lo que fue necesario humedecer el material durante cuatro horas antes de la mezcla, lo cual contribuyó a una mejor trabajabilidad del nuevo concreto. La densidad aparente (S), obtenida en el laboratorio de los agregados gruesos reciclados 18-25 MPa y 25-32 MPa, son un 19% menores en promedio comparados con el agregado grueso natural, provenientes del río Magdalena (Ricaurte, Cundinamarca) de la muestra patrón. La densidad nominal fue un 13% menor en promedio comparada con el agregado grueso natural. La densidad aparente (SSS), fue un 14% menor que el agregado grueso natural. La humedad de absorción de los agregados reciclados fue seis veces mayor que el agregado natural de la muestra patrón. La masa unitaria suelta de los agregados reciclados, son en promedio un 25%, menores que la del agregado natural de la muestra patrón. Entre tanto, la masa unitaria es un 22% menor en los agregados reciclados en relación con el agregado natural. En cuanto al desgaste obtenido en Máquina de los Ángeles para el agregado reciclado fue del 45%. El valor obtenido en la muestra patrón del 25%. Este mayor valor del agregado reciclado obedece a la gran cantidad de pasta de cemento que se adhiere a este. De otro lado se observó que mucho material se tritura perdiendo peso. Incide en este ensayo el tamaño de los agregados, el proceso de trituración y la resistencia del concreto de origen del agregado. La resistencia a la compresión del concreto fabricado con agregado grueso reciclado entre 18 y 25 MPa, cuya relación agua/cemento fue de 0.6 dio un 60% por debajo de la resistencia de diseño, mientras que la resistencia a la compresión del concreto fabricado con agregado grueso reciclado entre 25 y 32 MPa, superó la resistencia de diseño. El módulo de elasticidad del concreto fabricado con agregado reciclado de entre 18 y 25 MPa, tuvo un porcentaje mayor que el módulo del concreto fabricado con agregado reciclado entre 25 y 32 MPa, ya que el primero tuvo un módulo de elasticidad 37% por encima del módulo de elasticidad establecido según los parámetros de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, mientras que el segundo tuvo solamente un 1.09% del módulo de elasticidad según los parámetros de la citada norma. El módulo de elasticidad obtenido en el concreto reciclado con relación $A/C = 0.6$, correspondió al 67%, del concreto muestra patrón, mientras que para el concreto reciclado con relación $A/C = 0.4$, correspondió al 65% del concreto diseñado con agregado

natural. La resistencia a la compresión obtenida en el concreto reciclado con relación $A/C=0.6$, fue un 51% menor que la obtenida en el concreto con agregado natural para misma relación. De otro lado, la resistencia obtenida para el concreto reciclado con relación $A/C=0.4$, fue un 25% menor comparada con la del concreto natural. Para el caso del diseño de la mezcla realizada para el concreto reciclado, no se usó superfluidificante. La resistencia a la flexión obtenida para el concreto fabricado con agregado grueso reciclado con relación $A/C = 0.6$, corresponde al 82%, del obtenido con el concreto natural (muestra patrón). Para la relación $A/C = 0.4$, corresponde al 85%, del concreto natural. Se observa homogeneidad en los valores indistintamente de la relación A/C . Estos valores están entre los rangos de las investigaciones internacionales, donde se han encontrado valores límites entre el 80 y 100% de los concretos convencionales. La absorción obtenida para el concreto reciclado cuyos agregados de origen corresponden a una resistencia a la compresión entre 18 y 25 MPa, fue el 12.43%. Para el agregado reciclado entre 25 y 32 MPa, fue de 9.68%.

PINZÓN H. (2009), en su trabajo Valoración de Algunas Propiedades del Concreto Adicionado con Vidrio Pulverizado, realizó una valoración preliminar del concreto con adición de vidrio pulverizado, con respecto a propiedades en estado endurecido tales como: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, contracción y permeabilidad, usando cuatro dosificaciones (0, 5, 10 y 15%) de dicha adición en reemplazo equivalente del peso del cemento, concluyendo que, 1. El asentamiento y directamente la manejabilidad del concreto se vio disminuida con el aumento de la dosis de vidrio siendo la dosis de mayor efecto en esta característica la de 15 %, donde se redujo el asentamiento en un 23.5 %. 2. A pesar de que la resistencia a la compresión aumentó a los 56 días respecto a los 28 días con todas las dosis de vidrio, es de destacar que todas las mezclas con alguna adición de vidrio (5, 10 y 15 %) presentaron menor resistencia respecto a la muestra patrón. Sin embargo la que menos perdió resistencia respecto a la muestra patrón fue la dosis de 10% de vidrio (solo perdió el 7 % a los 28 días y el 3 % a los 56 días). El comportamiento menos favorable se presentó en la mezcla de 15 % de vidrio, con una pérdida de resistencia a la compresión de 22 % a los 28 días y de un 20 % a los 56 días respecto a la muestra patrón (sin vidrio). 3. La mezcla con 10 % de vidrio pulverizado presentó porcentajes de variación de longitud muy similares a los de la muestra patrón. Al contrario presentó mayores contracciones la mezcla de 5 % de adición de vidrio, siendo alrededor de un 60 % superiores respecto a la muestras patrón y de 10 %. La mezcla con mayor proporción de vidrio (15 %)

presentó menores cambios de longitud, alrededor de un 72 % menos que las muestras patrón y de 10 %. 4. Desde el punto de vista de durabilidad la adición en una mezcla de concreto de 15% de vidrio pulverizado resulta favorable, ya que se disminuye la retracción y sus posibles efectos por el menor contenido de cemento portland. 5. La absorción superficial a los 56 días fue considerablemente menor en todas las mezclas con vidrio respecto a la muestra patrón, estando en valores cercanos a 0.01, 0.008, 0.006 ml/(m²·s) medidos a 10, 30 y 60 minutos, mientras que la muestra sin vidrio absorbió 0.09, 0.06 y 0.04 ml/(m²·s) en estos tiempos. 6. A los 28 días, el comportamiento de la absorción superficial aumentó en las mezclas con vidrio pero se mantuvieron siempre en valores inferiores a los de la muestra patrón. Lo anterior indica una disminución de la permeabilidad de estas mezclas, y 7. El módulo de elasticidad calculado según la norma NTC 4025 se incrementó a los 56 días, en todas las mezclas con adición de vidrio pulverizado en comparación con la mezcla patrón. Sin embargo, el módulo de elasticidad teórico siempre fue inferior en las mezclas adicionadas en las diferentes edades de medición. La mezcla con 10% de adición fue la que presentó un módulo de elasticidad tanto teórico como calculado más aproximado al de la mezcla patrón.

ARRIAGA L. (2013), en su investigación titulada Utilización de Agregado Grueso de Concreto en Elementos Estructurales de Concreto Reforzado, construyó y ensayó especímenes para reproducir a escala, elementos como vigas, ménsulas y placas con concreto con agregados reciclados, encontrando que en los elementos estructurales hechos con concreto con 20% de agregados gruesos reciclados como reemplazo de agregado grueso natural, la resistencia es similar a las del concreto convencional.

TORRES N., y QUIROGA P. (2011), en su artículo Comparación del Comportamiento de Elementos Estructurales Elaborados con Concreto Convencional y Concreto con Agregados Reciclados en Colombia, plantean que como forma de promover el uso de concreto elaborado con agregado reciclado en Colombia, además de la investigación sobre las propiedades del mismo, es necesario recopilar datos sobre el comportamiento de los elementos estructurales de RCD. De igual forma, en su artículo Comparación del Comportamiento de Elementos Estructurales a Escala de Concreto Convencional y de Concreto con Agregados Reciclados, reportan que es importante repetir experimentos como el de ARRIAGA, L. (2013), con mayores contenidos de agregado reciclado. Así mismo

recomiendan, construir elementos estructurales y no estructurales en proyectos reales y monitorearlos para verificar su desempeño.

FUERTES A. (2012), en su trabajo Hacia un Desarrollo sostenible en la Producción de Concreto a partir de Desechos de Construcción de Mampostería de Arcilla, evaluó mediante ensayos de laboratorio algunas propiedades de probetas elaboradas a base de concreto con contenido reciclado producto del aprovechamiento del desecho de mampostería de arcilla, concluyendo que como solución al manejo integral de los RCD, es posible aprovechar el material de desecho de arcilla en concretos no estructurales, bloques y adoquines de uso normal.

En resumen, de las fuentes bibliográficas señaladas anteriormente, se resaltan los siguientes aspectos:

- En cuanto al agregado reciclado comparado con el agregado natural, este tiene mayor porosidad, mayor absorción, menor Densidad, mayor desgaste en la Máquina de los Ángeles, mayores contenidos de álcalis y el origen del agregado influye en las propiedades del concreto obtenido.
- En cuanto al concreto reciclado comparado con el concreto convencional, tiene menor resistencia a la compresión, menor módulo de elasticidad, menor resistencia a la flexión, menor velocidad de pulso ultrasónico; algunos autores marcan un límite del 30% de reemplazo de agregado para obtener un concreto con calidades similares al del concreto convencional, otros limitan dicho porcentaje al 20%. Alguna bibliografía sugiere tener en cuenta parámetros y coeficientes adecuados al comportamiento de estos concretos, otra que la aplicación del agregado reciclado en aplicaciones de volúmenes de cemento hasta 300 kg/m³, pues mayores serían poco económicas.
- En cuanto a durabilidad del concreto reciclado por ser más poroso tiene menor calidad debido a la presencia de grietas y fisuras, lo cual facilita el ataque por los agresores ambientales por ser menos resistente a factores externos, esto se incrementa en la medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado reciclado, no obstante

la evolución en el tiempo de las propiedades mecánicas del concreto reciclado es parecida a la de los concretos convencionales,

- En cuanto a la fabricación de elementos estructurales, en la Escuela Colombiana de Ingeniería, se realizaron aplicaciones prácticas de vigas y ménsulas y placas con porcentaje de reemplazo de agregado grueso del 20%, observándose que la resistencia y la rigidez fue similar a las realizadas con el concreto convencional. La Instrucción Española del Hormigón Estructural, EHE contempla el reemplazo del 20% de agregado reciclado para fabricación de concreto estructural; para concreto reciclado no estructural se permite el 100% de agregado reciclado. Algunos autores recomiendan la recopilación de datos de elementos estructurales con diferentes reemplazos de agregado para monitorear y verificar su desempeño.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

De acuerdo con los lineamientos de la investigación planteada, se relacionan a continuación las variables fundamentales que se tuvieron en cuenta para la fabricación del concreto reciclado: la relación A/C=0.5 para toda la mezcla, el porcentaje de reemplazo del agregado grueso para la mezcla patrón M1 es 0%, para M2 el 20% y para M3 el 40%. Para toda la mezcla se utilizó agregado fino natural en un porcentaje del 100%. El curado de los especímenes se hizo en inmersión de agua hasta el día del ensayo. Las edades de ensayo fueron a los 3, 28, 56 y 100 días. En el gráfico 1, se relacionan las variables señaladas:

Gráfico 1. Programa experimental



5.1 MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados para la presente investigación fueron suministrados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

5.1.1 Cemento

Para el presente proyecto se utilizó cemento portland tipo 1 marca SAMPER (CEMEX), el cual es utilizado en obras de concreto en general a las que no se les exige propiedades especiales y se puede adquirir en cualquier ferretería.

5.1.2 Agregado Fino Natural

El agregado fino natural utilizado para toda la mezcla procede del municipio de Tabio, Cundinamarca. Para todas las mezclas se utilizó el 100 % de agregado fino natural.

5.1.3 Agregado Grueso Reciclado

El agregado grueso reciclado utilizado en la mezcla de 20% y 40% de reemplazo proviene del reciclaje y trituración de cilindros de concreto almacenados en el laboratorio de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (fotografías 1, 2 y 3).



Fotografía 1. Cilindros reciclados y triturados

Fotografía 2. Trituración de cilindros



Fotografía 3. Agregado grueso reciclado



5.1.4 Aditivo

Para hacer más manejable la mezcla y obtener el asentamiento de 10 cm, se incorporó a la misma superfluidificante marca pozzolith.

5.1.5 Relación agua/cemento (A/C)

Se utilizó para el presente proyecto una relación agua/cemento, $A/C=0.5$

5.1.6 Nomenclatura utilizada porcentaje de reemplazo de agregado grueso

En la presente investigación para cada una de las mezclas de concreto se utilizaron diferentes porcentajes de reemplazo de agregado grueso reciclado, se usó la siguiente nomenclatura que será mencionada en lo sucesivo:

M1: cilindros de concreto reciclado con 0 % de reemplazo de agregado grueso

M2: cilindros de concreto reciclado con 20 % de reemplazo de agregado grueso reciclado

M3: cilindros de concreto reciclado con 40 % de reemplazo de agregado grueso reciclado

Nota: cuando a la nomenclatura anterior aparezca como "MX-X", indica lo siguiente:

M: muestra

MX: muestra con porcentaje de reemplazo (X=1, 0%; X=2, 20%; X=3, 40%)

MX-X: muestra con porcentaje de reemplazo y el número de ésta.

5.1.7 Ambiente de curado

Las probetas se desencofraron veinticuatro (24) horas después de fundidas y posteriormente se sumergieron en agua hasta el día del ensayo, en la fotografía 4 se observa los especímenes en la piscina de curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Fotografía 4. Curado de los cilindros sumergidos en agua. E.C.I.



5.1.8 Edades de ensayo

Las edades de ensayos fueron 3, 28, 56 y 100 días

5.2 ENSAYOS REALIZADOS

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas de los materiales utilizados (cemento y agregados), las propiedades mecánicas del concreto reciclado y pruebas para valorar la durabilidad del concreto reciclado. En el gráfico 2 se observan los diferentes tipos de ensayos que se ejecutaron en la presente investigación:

Gráfico 2. Ensayos realizados



5.2.1 Ensayos para determinar propiedades físicas de los materiales utilizados.

Se realizaron los siguientes ensayos a cada uno de los materiales para determinar sus propiedades físicas:

5.2.1.1 Cemento

Al cemento se le determinó el módulo de finura utilizando el permeabilímetro de Blaine de acuerdo a la Norma ICONTEC 33 (fotografía 5) y su densidad de acuerdo a la Norma ICONTEC 221 (fotografía 6).

Fotografía 5. Determinación módulo de finura del cemento. Permeabilímetro de Blaine



Fotografía 6. Determinación densidad del cemento. Frasco de Le Chatelier



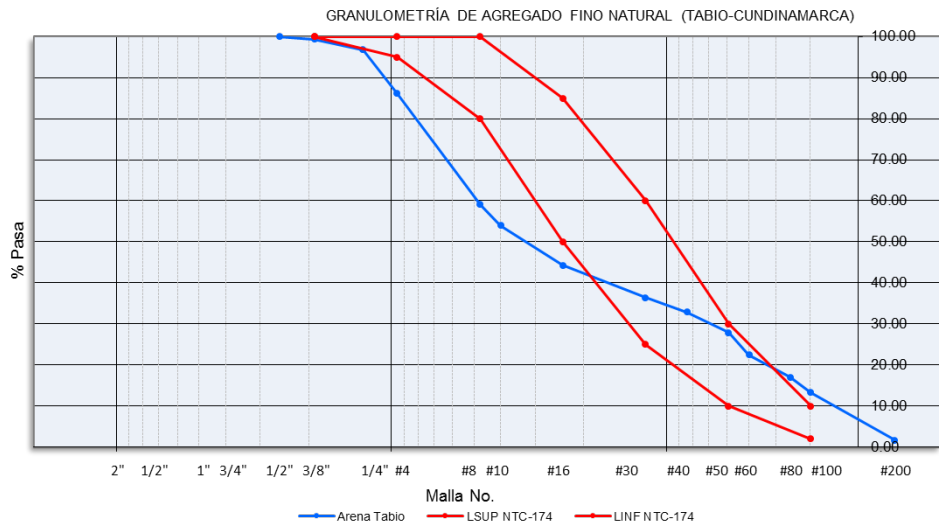
5.2.1.2 Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados y se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño, por tanto, la medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría. Los resultados del análisis granulométrico comúnmente se representan de manera gráfica mediante la curva de granulometría o línea de cribado. Generalmente en una gráfica de granulometría, sobre el eje de las ordenadas se representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices en escala aritmética y sobre el eje de las abscisas se indican las aberturas de los tamices, unas veces en escala aritmética, otras en escala logarítmica y algunas veces en una escala mixta.

5.2.1.3 Agregado fino natural

La determinación de las propiedades físicas del agregado fino natural se hizo acorde con lo estipulado en la Norma ASTM C 136 – 84a y C 117-87, Norma Técnica Colombiana NTC 77. El procedimiento para obtener la granulometría consistió en pasar la arena a través de los diferentes tamices, 1/2", 3/8", 1/4", No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.60, No.80, No.100 y No.200; luego se determinó el peso y el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices. La curva granulométrica se compara con límites establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 174, ASTM C 33.

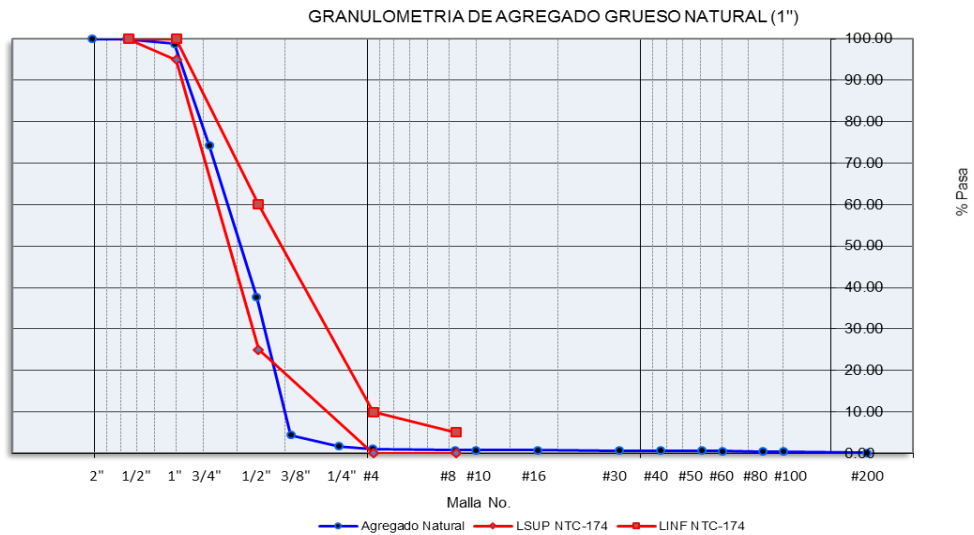
Gráfico 3. Granulometría agregado fino de Tabio, Cundinamarca



5.2.1.4 Agregado grueso natural

La determinación de las propiedades físicas del agregado grueso natural se hizo acorde con lo estipulado en la Norma ASTM C 136 – 84a y C 117-87, Norma Técnica Colombiana NTC 77. Se procedió a determinar la granulometría del material, pasando por cada uno de los tamices, 11/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", No.4, No.8, No.10, No.16, No.30, No.40, No.50, No.60, No.80, No.100 y No.200. La curva granulométrica se compara con límites establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 174 y ASTM C 33.

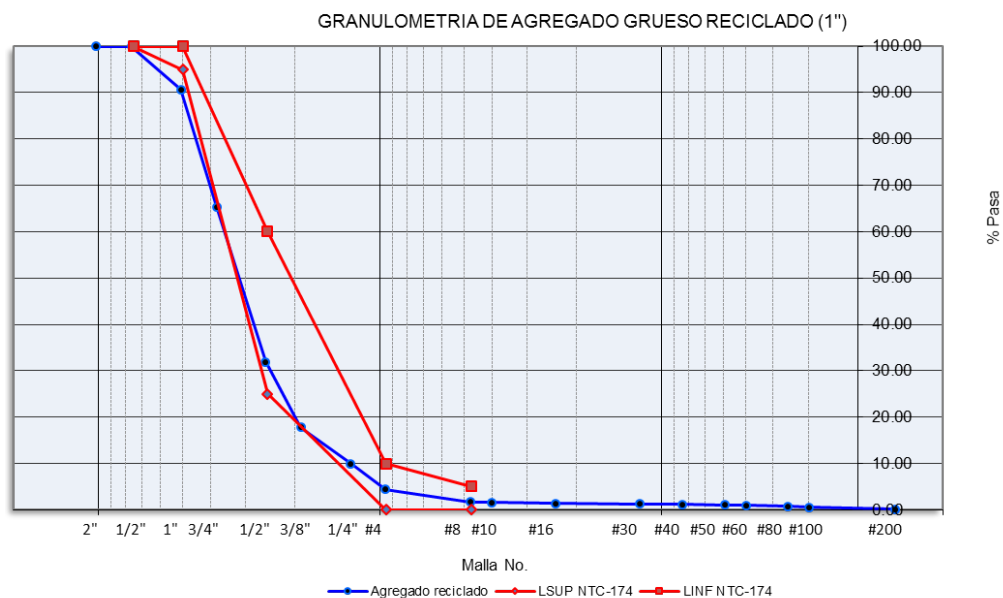
Gráfico 4. Granulometría agregado grueso de Tabio, Cundinamarca



5.2.1.5 Agregado grueso reciclado

La determinación de las propiedades físicas del agregado grueso reciclado se hizo acorde con lo estipulado en la Norma ASTM C 136 – 84a y C 117-87 y la Norma Técnica Colombiana NTC 77. Se procedió a determinar la granulometría del material, pasando por cada uno de los tamices, 11/2”, 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8”, 1/4”, No.4, No.8, No.10, No.16, No.30, No.40, No.50, No.60, No.80, No.100 y No.200; en el Gráfico 5 se observa la curva granulométrica del agregado grueso reciclado obtenida. La curva granulométrica se compara con límites establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 174, ASTM C 33.

Gráfico 5. Granulometría agregado grueso reciclado (Cilindros ECI)



5.2.1.6 Peso unitario

El peso unitario para los agregados utilizados se determinó de acuerdo con la Norma ASTM C 29-78.

5.2.1.7 Densidad y absorción

Se utilizó la Norma ASTM C 128-84, para determinar tanto la densidad como la absorción de cada uno de los agregados utilizados en la presente investigación.

5.2.1.8 Coeficiente de forma del agregado grueso natural y reciclado

La forma ideal de los agregados es la redonda ya que tienden a deslizarse mejor una sobre otras, siendo más fácil su acomodamiento con la tendencia a formar masas más compactas y densas. Lo anterior se traduce en mezclas que requieren menor cantidad de agua de mezclado para una determinada manejabilidad, mayor resistencia y menor cantidad de espacios. No obstante, la textura lisa correspondiente a este tipo de forma redondeada, conlleva una menor adherencia con la pasta que conlleva a una reducción en la resistencia. Sucede lo contrario con las partículas con formas no redondas, su grado de acomodamiento es menor, se necesita más agua para obtener más manejabilidad, pero esta deficiencia se ven compensadas con mayor adherencia con la pasta.

De acuerdo con lo anterior, el coeficiente de forma es un parámetro que mide cuanto más cerca o alejado está una partícula de grava a la forma esférica; entre más alargada sea su valor tiende a cero; entre mayor sea el valor se obtendrá un concreto más compacto.

5.2.1.10 Ensayo de resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles

Este ensayo es una medida de la degradación de los agregados minerales con gradaciones estándar que resulta de una combinación de acciones entre otras como la abrasión y el impacto dentro de un tambor de acero que rota y contiene un número específico de esferas de acero. Esta prueba se realizó de acuerdo con la Norma INVE-218, ASTM C 535, Norma Técnica Colombiana NTC 93. El procedimiento consistió en lavar y secar en el horno el agregado grueso reciclado hasta obtener masa constante, posteriormente se separó por tamaños con el objetivo de encontrar la mejor gradación descrita en la norma y determinar la escala correspondiente. Para esto se contempla una masa inicial de la muestra, se introduce el material en la Máquina de los Ángeles (fotografía 7), luego se incorpora un número de esferas según sea el caso, se pone a girar el tambor a una velocidad determinada de revoluciones por minuto, hasta un número indicado de vueltas. Posteriormente se saca el material y se pasa por el tamiz No.12, y el material retenido se seca en el horno hasta alcanzar masa constante. Obtenido el material bajo esta condición se procede a pesarlo y se calcula de manera porcentual la pérdida en peso del agregado reciclado con referencia a la masa inicial.

Fotografía 7. Ensayo resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles. ECI



5.2.1.11 Ensayo de Micro Deval

Este ensayo es una medida de durabilidad y de resistencia a la abrasión de los agregados minerales como resultado de la combinación de acciones que incluyen abrasión y desgaste con esferas de acero en presencia de agua. Este ensayo se realizó bajo la Norma ASTM D6928 con el objeto de determinar el porcentaje de pérdida de masa, tanto del agregado grueso natural como del reciclado (fotografía 8).

Fotografía 8. Máquina Micro Deval . E.C.I.



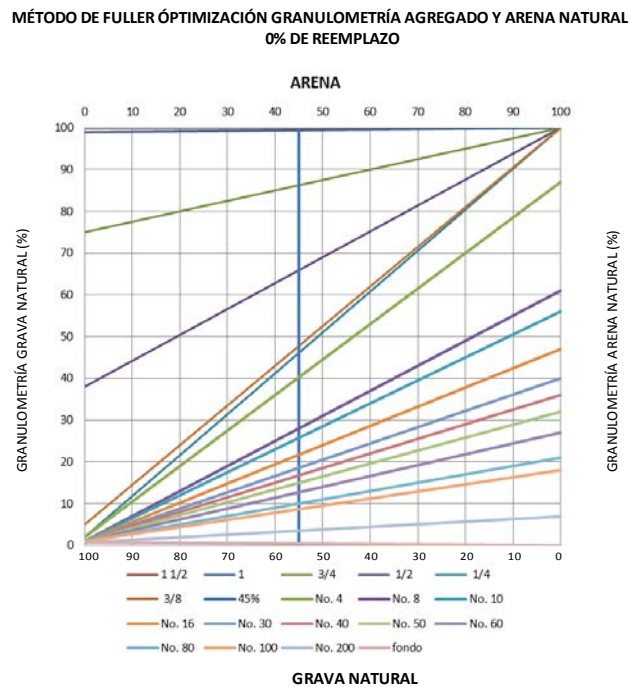
5.2.2 Diseño de mezclas

Para la fabricación del concreto reciclado se realizó un diseño de mezcla con tres porcentajes diferentes de remplazo de agregado reciclado del 0 %, 20 % y 40 %, para una resistencia a la compresión, f_c de 21 MPa, relación $a/c=0.5$, asentamiento máximo de 10

cm. Se mantuvo fija la cantidad de agua. Dado que no se disponían de gráficos y tablas para diseño de concreto reciclado se utilizaron las tablas de dosificación para concreto convencional, mediante las cuales se obtuvo la cantidad de agua necesaria, el contenido de aire naturalmente atrapado de la mezcla y el asentamiento para cumplir con los requerimientos del diseño.

Con el objetivo de lograr un concreto de mejor propiedad y manejabilidad se utilizó el método gráfico de ajuste de Fuller obteniéndose una combinación de 45% de agregado fino y 55% de agregado grueso. Es importante señalar que al momento de realizar el diseño de la mezcla los agregados estaban en condición SSS.

Gráfico 6. Método de Fuller Agregado Grueso Natural y Agregado Grueso Reciclado



5.2.3 Concreto en estado fresco

Para el concreto en estado fresco y para cada una de las mezclas M1, M2 y M3, se realizaron los siguientes ensayos: asentamiento, peso unitario de la mezcla, determinación

de la temperatura tanto del ambiente como de la mezcla, humedad relativa del ambiente y el contenido de aire de la mezcla (método de la presión).

5.2.4 Concreto en estado endurecido

5.2.4.1 Resistencia a la compresión (f'_c)

El ensayo de resistencia a la compresión (f'_c) se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-673, ASTM C39. Se hizo sobre cilindros de concreto (M1, M2 y M3) de 100 x 200 mm y para cuatro (4) edades: 3, 7, 56 y 100 días (fotografía 10); para el ensayo se utilizó una prensa hidráulica de 200 toneladas (fotografía 9).

Fotografía 9. Prensa hidráulica 200 t. Escuela Colombiana de Ingeniería.



Fotografía 10. Ensayo resistencia a la compresión. Cilindro fallado.



5.2.4.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se realizó bajo los parámetros contemplados en la Norma Técnica Colombiana NTC 4025, ASTM-C469. Se hizo sobre cilindros de concreto (M1, M2 y M3) de 100 x 200 mm y para cuatro (4) edades: 3, 7, 56 y 100 días, se usaron deformímetros calibrados previamente, cuya precisión es de 10^{-2} mm (fotografía 11)

Fotografía 11. Ensayo módulo de elasticidad. Laboratorio E.C.I.



5.2.4.3 Ensayo a la flexión

El ensayo de flexión se realizó de acuerdo con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 2871, ASTM C78. Se fallaron seis (6) viguetas de dimensiones 150 x 150 x 500 mm (dos viguetas para cada mezcla), para lo cual se utilizó una prensa hidráulica de 100 toneladas SHIMADZU UH-100A (fotografía 12). Cada una de las viguetas fue apoyada a 2.5 cm de los bordes externos, y la luz correspondiente entre los apoyos se dividió en tercios para determinar en cuál de ellos sucede la falla, y de esta forma calcular el módulo de rotura.

Fotografía 12. Montaje prueba de flexión vigueta (500 x 150 x 150 mm)



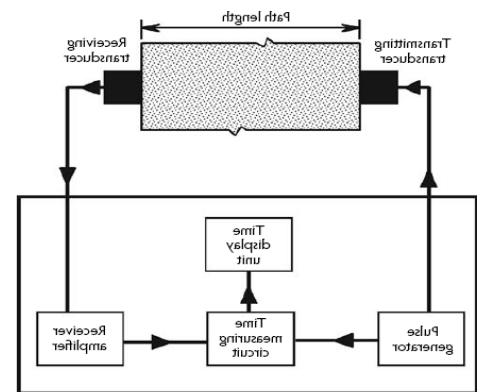
5.2.4.4 Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)

Consiste en medir en cuánto tiempo se propaga una onda tomando como referencia la medición del tiempo que toma esta en viajar entre dos puntos. Los pulsos son introducidos

al concreto mediante un transductor piezoeléctrico y un transductor similar que actúa como receptor para controlar la vibración de la superficie causada por la llegada del pulso (fotografía 13).

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) se realizó bajo los parámetros de la Norma Técnica Colombiana NTC 4325, sobre cilindros de concreto de 100 x 200 mm, para las diferentes mezclas y edades. Este ensayo mide el tiempo de propagación que tarda en viajar una onda entre dos puntos de referencia.

Fotografía 13. Equipo de pulso ultrasónico E.C.I. y esquema (Mindess y Young).



5.2.5 ENSAYOS DE DURABILIDAD

Según el American Concrete Institute (ACI) “La durabilidad del concreto de cemento hidráulico está definida como la habilidad para resistir la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. El concreto durable debe mantener su forma, calidad y condiciones de servicio originales cuando es expuesto al ambiente”.

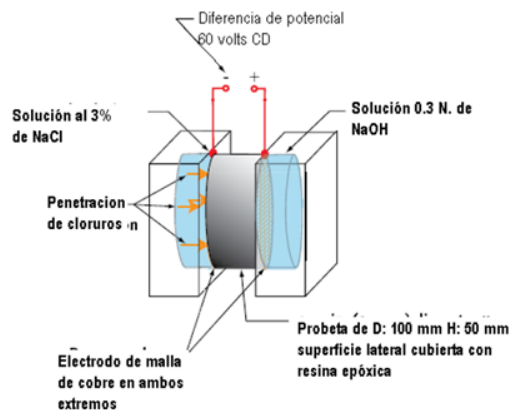
Para analizar el comportamiento del concreto durante su vida útil, o sea su durabilidad, se realizaron los siguientes ensayos a los especímenes de concreto para cada una de las mezclas M1, M2 y M3.

5.2.5.1 Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros

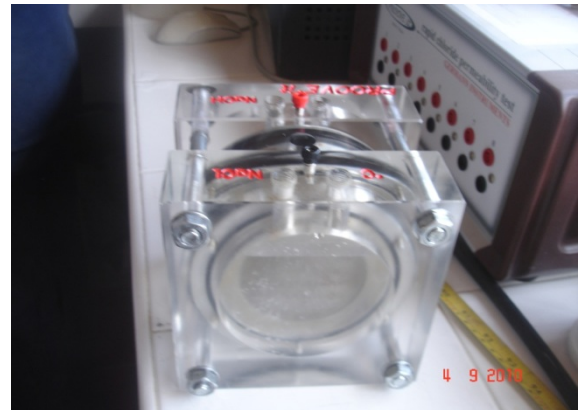
Este ensayo permite determinar la mayor o menor facilidad que ofrece el concreto al paso de corriente eléctrica con un diferencial de potencial de 60 voltios. Para la presente

investigación se utilizó la prueba acelerada de permeabilidad a los cloruros (Rapid Chloride Permeability Test) contemplada en la norma técnica ASTM C1202. La edad de ensayo para cada uno de los especímenes de concreto (M1, M2 y M3) fue de 28 y 56 días. Se utilizaron doce (12) discos de concreto (cuatro por mezcla) de 100 x 50 mm, estos se sellaron en el perímetro con resina epóxica Sikadur 32 y se introdujeron en un dispositivo (fotografía 14), que permite por cada uno de sus extremos incorporar un tipo de solución compuesta por Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%, y una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) de 0.3 M (fotografía 16). Posteriormente se hizo registro de información durante seis (6) horas tomando lecturas cada cinco (5) minutos.

Gráfico 7. Esquema del montaje ensayo penetración de cloruros. Gómez G.



Fotografía 14. Montaje ensayo permeabilidad a cloruros, E.C.I.



5.2.5.2 Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno en el cual el CO_2 de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del cemento hidratado y da lugar a una pérdida de alcalinidad del concreto produciendo una disminución del PH, esto da lugar a la aparición de una región neutralizada, llamada frente carbonatado, que al llegar a la armadura, la despasiva de forma generalizada (MORENO, E. I., 2004). La velocidad con que el frente de carbonatación avanza es función de aspectos como la edad de la estructura, nivel de CO_2 en el ambiente que normalmente es del 0.035%, humedad relativa del medio ambiente y variación de la humedad en la estructura, temperatura, calidad de la pasta del concreto,

calidad del concreto (porosidad) que dependen de la relación agua cemento A/C, grado de compactación del concreto, curado y el cuidado durante el proceso de fraguado.

Dado que el proceso de carbonatación es un proceso lento, se utilizó una cámara de carbonatación con el objetivo de exponer los especímenes de concreto a un ambiente con mayor concentración de CO₂ (4%) y, posteriormente medir el avance del frente de carbonatación de manera acelerada y poder hallar el valor de la constante K, la cual correlaciona de forma cuantitativa la calidad del concreto (*fotografía 15*). Se utilizaron 6 cilindros de concreto de 100 x 200 mm (dos para cada mezcla M1, M2 y M3).

Fotografía 15. Cámara de carbonatación. Escuela Colombiana de Ingeniería



5.2.5.3 Tasa de absorción superficial inicial ISAT

Para el ensayo de tasa de absorción superficial inicial ISAT, se siguieron las exigencias de la Norma Británica BS 1881 parte 208, que permite determinar la dirección y medición del rango de tiempo que tarda en desplazarse una lámina de agua dentro de un capilar que se encuentra conectado a una base acrílica dispuesta directamente y a presión sobre la superficie del espécimen de concreto. A esta base se conecta un reservorio de agua que mantiene saturada la superficie de la muestra (*fotografía 16*). Determinada la información anterior, se calcula el coeficiente de permeabilidad (K) del concreto endurecido indicando la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo y superficie.

Fotografía 16. Montaje ensayo tasa de absorción superficial inicial (ISAT).



5.2.5.4 Sortividad

JOVANÉ M. (2009), menciona que la sortividad es un índice de transporte de humedad a un espécimen no saturado que permite evaluar la durabilidad, ya que refleja la forma en que el concreto es penetrado por el agua y otros agentes agresivos, proporcionando una buena medida de la calidad de la superficie del concreto. El ensayo de sortividad permite determinar el índice de la absorción de agua en el concreto de cemento hidráulico. Para lo anterior, se mide el aumento de masa del espécimen de concreto expuesto solo por una superficie en función del tiempo para calcular el índice inicial de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$) y la tasa secundaria de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$). Este ensayo se realizó de acuerdo con la Norma Técnica ASTM C 1585, para lo cual se usaron probetas de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura, las cuales fueron tomadas de cilindros de 100 x 200 mm. Las probetas se colocaron en un desecador para controlar la humedad relativa. Se dispuso del siguiente montaje para el ensayo (*fotografía 17*).

Fotografía 17. Montaje acorde con ASTM C 1585.

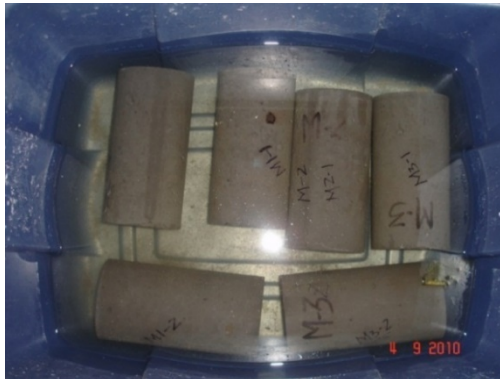


5.2.5.5 Sulfatos

Una de las formas de ataque químico al concreto es la acción de los sulfatos, esta se manifiesta como una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo, GONZÁLEZ, M. (1991). A esta exudación blanquecina se le conoce como ettringita o sal de candlot, la cual aumenta el volumen del concreto provocando fisuras y facilitando el ingreso de agua agresiva que favorece la disgregación del concreto, LÓPEZ, F. (2008).

Con el objetivo de observar el incremento de volumen en el concreto sometido a sulfatos, se ensayaron 6 cilindros de concreto de 100 x 200 mm (2 muestras para cada concreto). Los cilindros fueron curados en agua durante 32 días y posteriormente se sumergieron en solución de sulfato de sodio con agua destilada durante 68 días (*fotografías 18, 19, 20*), tiempo en el cual se controló el PH, entre un rango de 6 y 8.

Fotografía 18. Especímenes en solución de sulfato de sodio



Fotografía 19. Especímenes con Ettringita o sal de Candlot



6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se mostrarán a continuación los resultados obtenidos con los comentarios respectivos. Teniendo en cuenta que el concreto es un material que presenta una alta variabilidad debido a la incertidumbre en el control de algunas variables para su fabricación, curado y errores en los diferentes ensayos de los especímenes y especialmente por el número pequeño de muestras ensayadas se hizo la validación de los resultados obtenidos para determinar la exclusión o no de datos de la serie original, para lo cual se utilizó el criterio excluyente de Chauvenet, para esto se determinó la media aritmética y la desviación estándar de los datos ya homogeneizados, posteriormente se calcularon las desviaciones máximas, para determinar la relación S_{max}/S , esta relación se comparó con los valores críticos (K_c) aportados por Chauvenet los cuales dependen del número de datos analizados (n). Para el presente proyecto se utilizó para $n=2$, $K_c=1.15$ y para $n=3$, $K_c=1.38$. Los cálculos respectivos se encuentran en el anexo correspondiente. Una vez determinado la no existencia de datos discrepantes, se analizaron los resultados estadísticamente utilizando la desviación estándar.

6.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

6.1.1 Cemento

La densidad del cemento portland tipo 1 marca SAMPER (CEMEX) obtenido fue de 3.08 g/cm^3 (3080 kg/m^3).

6.1.2 Agregado Fino Natural

En la tabla 1, se relacionan las propiedades físicas obtenidas del agregado fino natural proveniente del municipio de Tabio, Cundinamarca:

Tabla 1. Resultados propiedades físicas agregado fino natural

Densidad Aparente. S:	2.47 g/cm ³
Densidad Nominal:	2.63 g/cm ³
Densidad Aparente S.S.S.:	2.53 g/cm ³
Humedad de Absorción:	2.4 %
Masa U. Suelta:	1581 kg/cm ³
Masa U. Compacta:	1768 kg/cm ³
Resultado de la Prueba Colorimétrica	4

6.1.3 Agregado grueso natural

En la tabla 2, se relacionan las propiedades físicas obtenidas del agregado grueso natural proveniente del municipio de Tabio, Cundinamarca:

Tabla 2. Resultados propiedades físicas agregado grueso natural

T. Maximo:	1 1/2"
T. Maximo Nominal:	1"
Densidad Aparente. S:	2.36 g/cm ³
Densidad Nominal:	2.60 g/cm ³
Densidad Aparente S.S.S.:	2.45 g/cm ³
Humedad de Absorción:	3.9 %
Masa U. Suelta:	1318 kg/m ³
Masa U. Compacta:	1474 kg/m ³

6.1.4 Agregado grueso reciclado

En la tabla 3, se relacionan las propiedades físicas obtenidas del agregado grueso reciclado proveniente de la trituración de cilindros de concreto del laboratorio de Estructuras y Materiales de la ECI.

Tabla 3. Resultados propiedades físicas agregado grueso reciclado

Tamaño Máximo	1½"
Tamaño Máximo Nominal	1"
Densidad Aparente. S:	2.12 g/cm ³
Densidad Nominal:	2.54 g/cm ³
Densidad Aparente S.S.S.:	2.29 g/cm ³
Humedad de Absorción:	7.8 %
Masa U. Suelta:	1132 kg/m ³
Masa U. Compacta:	1282 kg/m ³

Se resumen comparativamente en la tabla 4, las propiedades físicas obtenidas del agregado grueso natural y el reciclado.

Tabla 4. Comparación propiedades físicas agregados natural y reciclado

PROPIEDAD FÍSICA	Agregado Grueso Natural	Agregado Grueso Reciclado	Variación %
Densidad Aparente. S (g/cm ³)	2.36	2.12	-10%
Densidad Nominal (g/cm ³)	2.60	2.54	-2%
Densidad Aparente S.S.S. (g/cm ³)	2.45	2.29	-6%
Humedad de Absorción (%)	3.90	7.80	100%
Masa Unitaria Suelta: (kg/m ³)	1318	1132	-14%
Masa Unitaria Compacta (kg/m ³)	1474	1282	-13%
Tamaño Máximo Nominal	1"	1"	
Tamaño Máximo	1½"	1½"	

De acuerdo con los datos relacionados en la tabla 4, se puede observar que la densidad aparente del agregado grueso reciclado fue un 10% menor que la del agregado natural. La densidad nominal del agregado reciclado fue 2% menor que la del agregado natural. De otro lado, la densidad aparente SSS, para el agregado reciclado fue un 6.5% menor que la del agregado natural.

La humedad de absorción para el agregado grueso reciclado fue el doble de la obtenida en el agregado grueso natural, aspecto que era de esperarse debido a que el material reciclado tiene pasta de cemento que incide de forma directa en la humedad de absorción. Entre tanto, la masa unitaria suelta y la masa unitaria compacta en el agregado reciclado fueron menores en un 14% y un 13%, en relación a las del agregado natural.

6.1.5 Coeficiente de forma del agregado grueso natural y reciclado

En la Tabla 5, se relaciona los resultados obtenidos del coeficiente de forma tanto del agregado grueso natural como reciclado.

Tabla 5. Resultados coeficiente de forma agregado grueso natural

COEFICIENTE DE FORMA	
AGREGADO GRUESO NATURAL	0.31
AGREGADO GRUESO RECICLADO	0.24

El coeficiente de forma obtenido para el agregado natural fue de 0.31 mientras que para el agregado reciclado fue de 0.24, o sea el agregado grueso reciclado fue un 22% menor. De acuerdo a lo anterior, el agregado grueso natural tiene las partículas más redondas que las del agregado reciclado. No obstante el coeficiente de forma de 0.24 obtenido para en el agregado reciclado, es mayor a 0.20 que es el valor mínimo que se sugiere en diferentes estudios.

6.1.6 Ensayo de resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles

En la Tabla 6, se relacionan comparativamente los resultados correspondientes al desgaste tanto del agregado grueso natural como reciclado en la Máquina de los Ángeles:

Tabla 6. Resultados ensayo de desgaste en la Máquina de los Ángeles

% DESGASTE SEGÚN TIPO DE AGREGADO GRUESO	
Natural	Reciclado (Triturado)
30.3	40.5

El porcentaje al desgaste en la Máquina de los Ángeles para el agregado natural fue del 30.3%, mientras que para el agregado reciclado fue del 40.5%, o sea este último tuvo un 10% más de desgaste. Este mayor porcentaje obtenido se debe a que el agregado grueso durante el ensayo elimina el mortero que tiene adherido.

6.1.7 Ensayo de Micro Deval

En la tabla 7, se relacionan los resultados obtenidos en el ensayo de Micro Deval, de agregado grueso natural y reciclado:

Tabla 7. Resultados ensayo Micro Deval

% DESGASTE SEGÚN TIPO DE AGREGADO GRUESO	
Natural	Reciclado (Triturado)
16.5	31

El porcentaje al desgaste obtenido del ensayo Micro Deval para el agregado natural fue del 16.5%, mientras que para el agregado reciclado fue del 31%; o sea, el agregado grueso reciclado tuvo un 14.5% más desgaste que el agregado grueso natural.

Tabla 8. Resumen de las Propiedades físicas y mecánicas de los agregados gruesos

PROPIEDAD FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Natural	Reciclado
Tamaño Máximo	1½"	1½"
Tamaño Máximo Nominal	1"	1"
Densidad Aparente, S (g/cm ³)	2.36	2.12
Densidad Nominal (g/cm ³)	2.60	2.54
Densidad Aparente S.S.S. (g/cm ³)	2.45	2.29
Humedad de Absorción (%)	3.9	7.8
Masa U. Suelta (kg/m ³)	1318	1132
Masa U. Compacta (kg/m ³)	1474	1282
Coefficiente de Forma	0.31	0.24
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	30.3	40.5
Ensayo de Micro-Deval (%)	16.5	31.0

6.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO

Los porcentajes de agregados utilizados obtenidos de la aplicación del método de Fuller, para las diferentes mezclas fue la siguiente:

- **M1:** 45 % de arena y 55 % de agregado grueso
- **M2:** 45 % de arena y 55 % de agregado grueso
- **M3:** 45 % de arena y 55 % de agregado grueso

En la tabla 9, se encuentran consignadas las cantidades de material utilizado el diseño de la mezcla, en kg/m³, según corresponda al porcentaje de reemplazo de agregado grueso reciclado.

Tabla 9. Proporciones de materiales en cada mezcla (kg/m³)

MATERIAL	UN.	% DE REEMPLAZO AGREGADO GRUESO RECICLADO		
		0%	20%	40%
Agua	kg	195	195	195
Cemento	kg	390	390	390
Agregado grueso natural	kg	859	687	516
Agregado grueso Reciclado	kg	0	155	310
Agregado fino	kg	739	739	739
Superfluidificante	kg	5.1	3.9	2.0
		2188	2170	2151

El peso de cada m³ de mezcla de concreto fue el siguiente: para M1, 2188 kg, para M2, 2170 kg y para M3, 2151 kg. De los resultados obtenidos se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo del agregado reciclado, menor es el peso del concreto por m³, en razón a que la masa unitaria del agregado reciclado es menor que la del agregado natural.

6.3 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

En la tabla 10, se relacionan los resultados de los ensayos realizados al concreto en su estado fresco para cada una de las mezclas, M1, M2 y M3.

Tabla 10. Resultados obtenidos concreto en estado fresco

ENSAYO CONCRETO ESTADO FRESCO	UN.	% DE REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO RECICLADO (a/c=0.5)		
		0%	20%	40%
Asentamiento	cm	7.5	10.0	7.0
Peso Unitario de la mezcla	kg	2220	2213	2189
Temperatura ambiente	°C	20	22	24
Temperatura de la mezcla	°C	19.5	21.5	23.5
Humedad relativa del ambiente	%	58.0	52.5	50.5
Contenido de aire (método presión)	%	1.5	1.65	1.5
Superfluidificante utilizado en la mezcla	%	1.30	1.00	0.50

Se observa que para el concreto M1, el asentamiento fue de 7.5 cm, para M2 10 cm y para M3, 7.0 cm. Los resultados obtenidos permiten observar que el concreto con agregado reciclado tuvo una mejor manejabilidad comparada con el concreto con agregado natural, esto en razón a que se necesitó menos superfluidificante para obtener el asentamiento concebido en el diseño de la mezcla. Adicionalmente, el agregado grueso reciclado se pre saturó con el objetivo de obtener mejor trabajabilidad de la mezcla.

6.4 ENSAYOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO

6.4.1 Ensayo a la compresión

Se relacionan a continuación, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de resistencia a la compresión para cada uno de los concretos fabricados M1, M2 y M3 y según las edades de ensayo:

Tabla 11. Resistencia promedio a la compresión obtenida (MPa)

EDAD	M1	M2	M3	COMPARATIVO	
				M2 vs M1	M3 vs M1
3 días	17.3	17.3	14.7	0%	-15%
28 días	26.0	27.5	24.5	6%	-6%
56 días	27.0	30.5	27.5	13%	2%
100 días	29.0	34.0	29.5	17%	2%
100 días*	36.5	38.0	34.5	4%	-5%

* Concreto sumergido en sulfato

CONVENCIONES UTILIZADAS

M1 remplazo agregado grueso 0%

M2 remplazo agregado grueso 20%

M3 remplazo agregado grueso 40%

Gráfico 8. Comparativo promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).

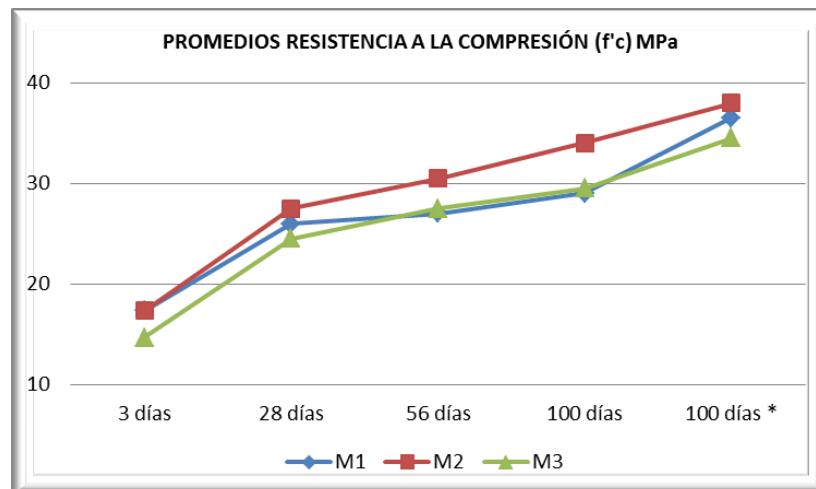
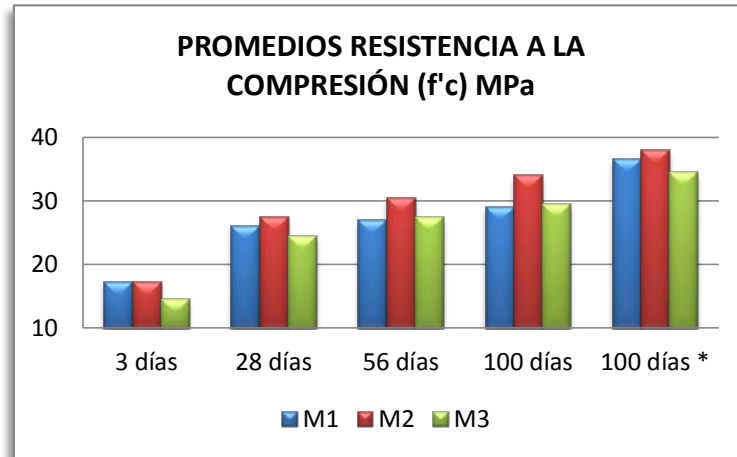
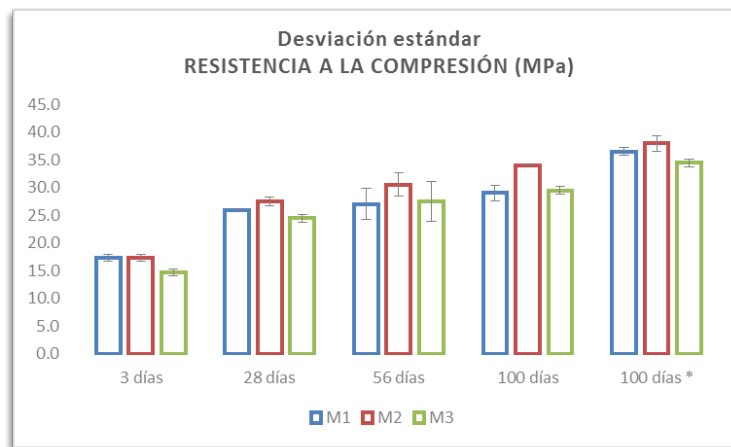


Gráfico 9. Promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).



De acuerdo con los datos resultados obtenidos la resistencia a la compresión, f'_c , obtenida a los 3 días tanto para el concreto convencional, M1 como para el concreto reciclado con 20% de reemplazo de agregado grueso reciclado M2 fue la misma, 17.3 MPa., de otro lado, a los 28, 56 y 100 días el concreto M2 tuvo una mayor resistencia que el concreto convencional M1, en porcentajes del 6%, 13%, 17% y 4%, mayor respectivamente. El concreto reciclado M3, a los 3 y 28 días tuvo una resistencia menor en un 15% y un 6% respectivamente frente al concreto M1, sin embargo, a los 56 y 100 días M3 tuvo un 2% más de resistencia que M1. No obstante lo anterior, en los concretos M1, M2 y M3, se obtuvieron resistencias superiores a las de diseño 21 MPa, a los 28 días; para el caso particular del concreto M2 fue un 31% mayor.

Gráfico 10. Desviación estándar resistencia a la compresión (MPa)



Teniendo en cuenta la desviación estándar se puede observar que a los 3 y 56 días de ensayo los concretos M1 y M2 tuvieron una resistencia a la compresión similar, no obstante a los 28, 100 y 100* días el concreto M2 tuvo una mayor resistencia a la compresión. Los concretos M1 y M3 a los 28, 56 y 100 días infieren una resistencia a la compresión similar.

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos muestran que el concreto reciclado con 20% de reemplazo de agregado grueso tiene un buen comportamiento, sugiriendo como lo indican diferentes normas que este porcentaje de reemplazo es el máximo recomendado para obtener un concreto de calidad.

6.4.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto es un parámetro mecánico muy importante, se relacionan a continuación los resultados obtenidos:

Tabla 12. Promedio módulo de elasticidad (MPa)

EDAD	M1	M2	M3
3 días	15858	15054	13445
28 días	18961	17754	17237
56 días	17582	19650	19305
100 días	19650	22063	20857
100 días *	24304	22408	21029

*Concreto sumergido en sulfato

Gráfico 11. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)

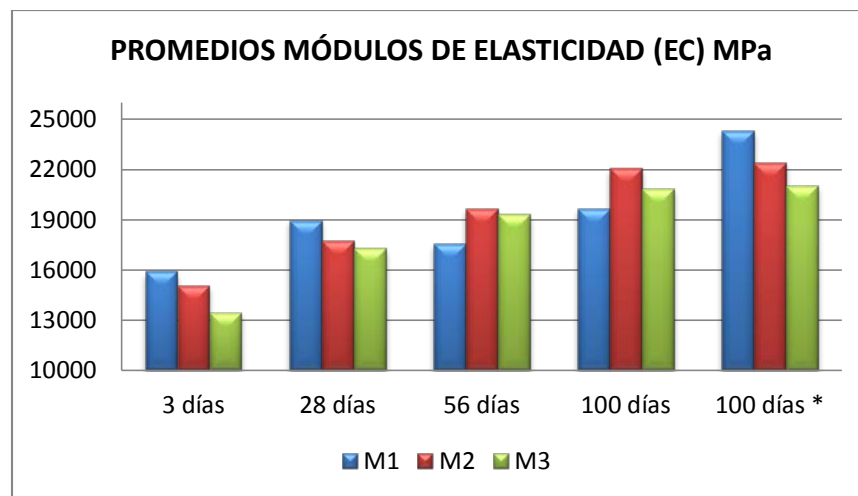
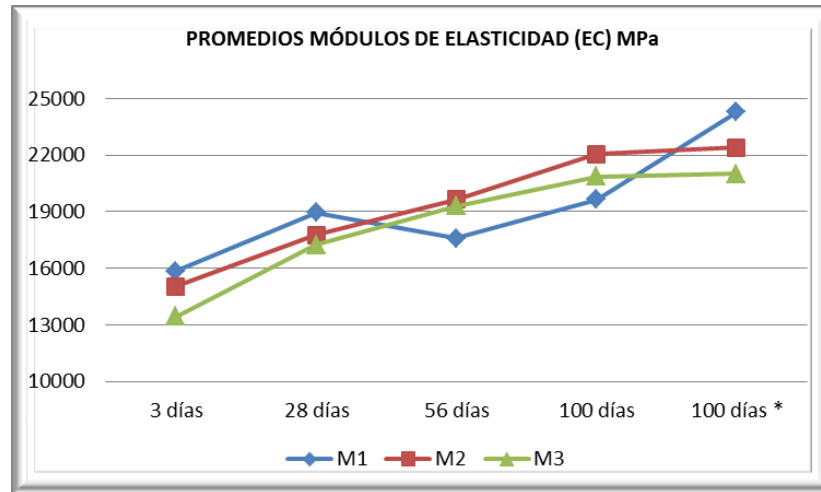


Gráfico 12. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)



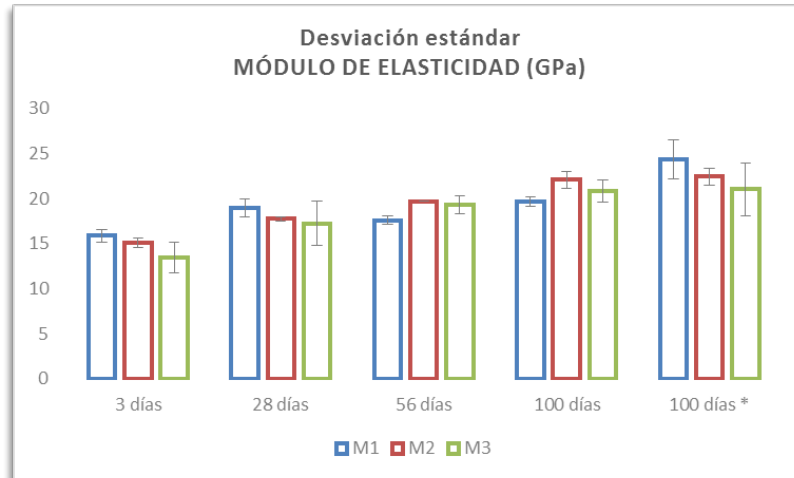
De acuerdo con los datos obtenidos se puede observar que el módulo de elasticidad del concreto reciclado M2 y M3 para edades de 3 y 28 días es menor que el obtenido en el concreto M1, en 5% y 18% a los 3 días y en un 7% y 10% a los 28 días respectivamente.

Sucede lo contrario para las edades de 56 y 100 días, donde el concreto M2 y M3 tuvieron un módulo de elasticidad mayor que el concreto M1, así, a los 56 días el concreto un 12% y 10% y a los 100 días 12% y 6% respectivamente.

Para el concreto sumergido en sulfato (100*) el módulo de elasticidad para los concretos reciclado M2 y M3 son menores que el módulo de elasticidad del concreto M1, en un 8% y 13% respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos a los 3 y 28 días se puede observar que el concreto M1, es más rígido que el concreto reciclado M2 y M3, sucediendo lo contrario para edades de 56 y 100 días donde el concreto M1 tuvo menor módulo de elasticidad que M2 y M3.

Gráfico 13. Desviación estándar módulo de elasticidad



Teniendo en cuenta la desviación estándar se puede observar que el módulo de elasticidad obtenido en M1 y M2 a los tres días es particularmente similar. A los 28 días se evidencia que el concreto M1 tiene mayor módulo de elasticidad, aspecto que cambia en la medida transcurre el tiempo donde especialmente a los 56 y 100 días donde se observa un mayor módulo de elasticidad para los concretos reciclado M2 y M3.

Se comparan a continuación los coeficientes de elasticidad K, para determinar el módulo de elasticidad mediante la fórmula: $E_c = K\sqrt{f'_c}$ con los coeficientes de elasticidad referenciados en la NSR-98 (C.8.5.4.1) y NSR-10 (C.8.5.1).

Tabla 13. Comparación coeficientes de elasticidad K, a los 28 días

CONSTANTE	M1	M2	M3
K NSR-98	3900	3900	3900
K NSR-10	4700	4700	4700
K Calculado	3718	3386	3486

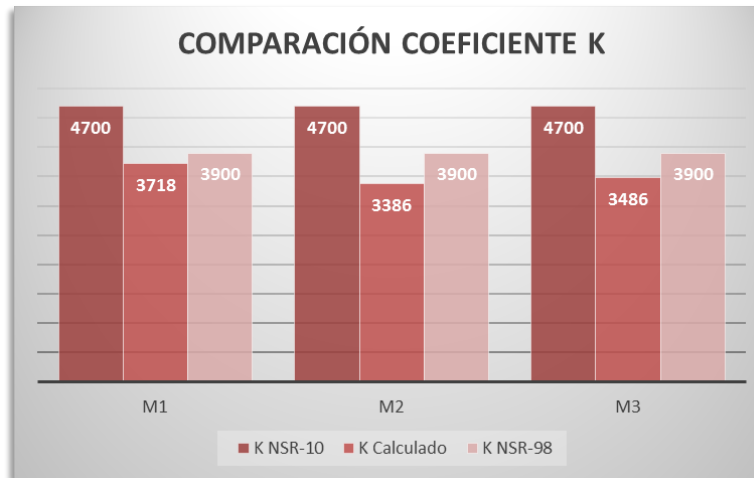
CONVENCIONES UTILIZADAS

M1 reemplazo agregado grueso **0%**

M2 reemplazo agregado grueso **20%**

M3 reemplazo agregado grueso **40%**

Gráfico 14. Comparación coeficiente K NSR-98 – NSR 10



Los valores del coeficiente de elasticidad K hallado en los concretos analizados fueron menores que el coeficiente de elasticidad contemplado en la Norma de Construcción Sismo resistente NSR-98. La reducción fue la siguiente: M1, 5%, M2 con 13% y M3 11%.

De igual manera los valores del coeficiente de elasticidad K hallado en los concretos analizados fueron menores que el coeficiente de elasticidad contemplado en la Norma de Construcción Sismo resistente NSR-10. La reducción fue la siguiente: M1, 21%, M2 con 28% y M3 26%.

Los valores obtenidos de los coeficientes de elasticidad K, en la presente investigación muestran que los concretos M1, M2 y M3, tienen más deformación que los referidos en la NSR-98 y NSR-10 de acuerdo a K.

6.4.3 Ensayo a la flexión

A continuación se relacionan los valores correspondientes a los ensayos a flexión de cada una de las viguetas de concreto, según porcentaje de agregado reemplazado.

Tabla 14. Promedio de resistencia a la flexión a los 28 días de edad

CONCRETO	Promedio Carga máxima Aplicada (kg)	MR (MPa)
M1- 0% reemplazo agregado grueso	2830	3.85
M2- 20% reemplazo agregado grueso	2921	3.97
M3- 40% reemplazo agregado grueso	2466	3.35

De acuerdo con resultados anteriores se observa que el mayor módulo de rotura que se obtuvo fue el del concreto reciclado M2, seguido del concreto convencional M1 y posteriormente el concreto reciclado M3, en porcentaje de 3% mayor que M1 y 19% mayor que M3. No obstante lo anterior, los concretos señalados estuvieron dentro del rango previsible de MR, referido a la resistencia a la compresión en un porcentaje de resistencia entre el 11% y el 23%, a los 28 días. Tomando como referencia la resistencia a la compresión a los 28 días obtenida en cada uno de los concretos el porcentaje del MR, para el concreto reciclado M1, 15%, concreto reciclado M2 y M3, 14%.

Gráfico 15. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico



Teniendo en cuenta la desviación estándar se puede observar que el concreto M1 y M2 tienen un comportamiento similar en cuanto al módulo de rotura. El concreto M3 de acuerdo a lo observado tuvo un menor módulo de rotura. Lo anterior indica

que el concreto con 20% de reemplazo de agregado grueso reciclado tiene características similares de dispersión de resultados en cuanto a módulo de rotura respecto a las del concreto convencional.

6.4.4 Velocidad de pulso ultrasónico

Los datos obtenidos se relacionan en la tabla 15,

Tabla 15. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico (m/s)

EDAD (DÍAS)	M1	M2	M3	VARIACIÓN M1-M2	VARIACIÓN M1-M3
3	3388	3370	3262	0,6%	3,9%
28	3758	3701	3697	1,6%	1,7%
56	3671	3713	3693	-1,1%	-0,6%
100	3921	3964	3897	-1,1%	0,6%
100*	4055	4025	3966	0,7%	2,2%

Gráfico 16. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico

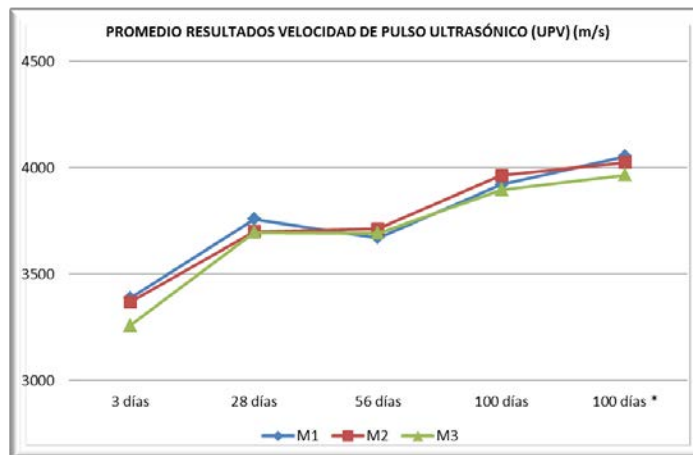
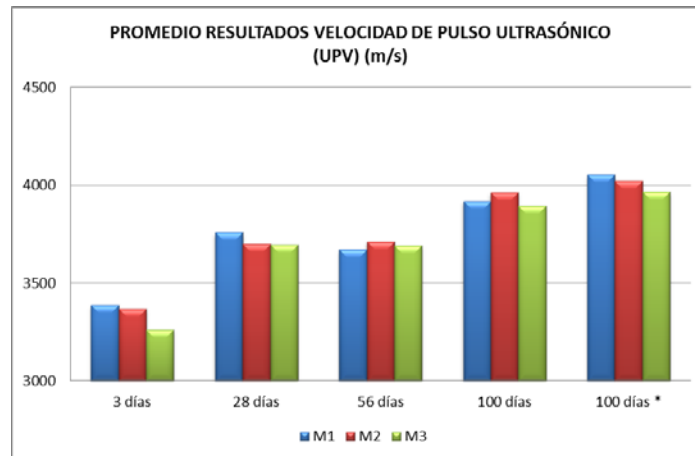


Gráfico 17. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico



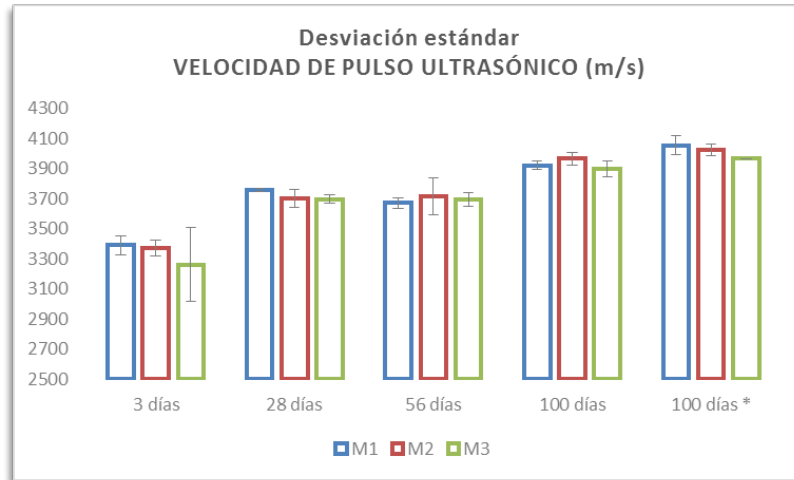
De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que la velocidad de pulso ultrasónico para el concreto no mostró diferencias significativas de acuerdo a la edad de ensayo. No obstante lo anterior se puede analizar lo siguiente:

La velocidad de pulso ultrasónico del concreto convencional M1, a los 3 días de edad, fue mayor que las obtenidas en el concreto reciclado M2 y M3. Si nos apoyamos en la correlación que existe entre la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) y la resistencia a la compresión se puede expresar que las velocidades halladas tienen correspondencia con los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para la misma edad.

A los 28 días la velocidad de pulso ultrasónico del concreto convencional M1, fue mayor que las obtenidas en el concreto reciclado M2 y M3. Estos resultados difieren con los obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión donde la mayor resistencia la tuvo el concreto reciclado M2.

A los 56 y 100 días (curado en agua), la velocidad de ultrasonido (UPV), es consistente con las resistencias halladas en el ensayo de resistencia a la compresión donde el concreto reciclado M2, tuvo mayor resistencia. Difieren los resultados a los 100 días * (sumergido en sulfato) donde la mayor UPV estuvo en el concreto convencional M1, y en el ensayo de resistencia a la compresión M2, fue el que tuvo mayor resistencia.

Gráfico 18. Promedio resultados velocidad de pulso ultrasónico



Teniendo en cuenta la desviación estándar de los resultados obtenidos se puede observar de manera general que el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico tanto para el concreto convencional como para el reciclado tienen un comportamiento similar para las diferentes edades de ensayo. De otro lado, los resultados obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico tienen correlación con los resultados de resistencia a la compresión obtenidos.

De acuerdo con la Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica, SOLÍS R., et al. (2004), para las diferentes edades analizadas el concreto tanto convencional como reciclado clasifica como “Bueno”, dado que está entre velocidades de $4575 > V > 3660$. En la tabla 16, se muestra un resumen general de las propiedades mecánicas obtenidas de los diferentes concretos a los 28 días de edad.

Tabla 16. Resumen promedio de las propiedades mecánicas a los 28 días.

PROPIEDAD	M1 (0%)	M2 (20%)	M3 (40%)
Resistencia Promedio a la Compresión , f'c (MPa)	26	27.5	24.5
Promedio Módulo de Elasticidad , Ec (GPa)	19	18	17
Resistencia a la Flexión (módulo de rotura, MPa)	3.85	3.97	3.35

6.5 ENSAYOS DE DURABILIDAD

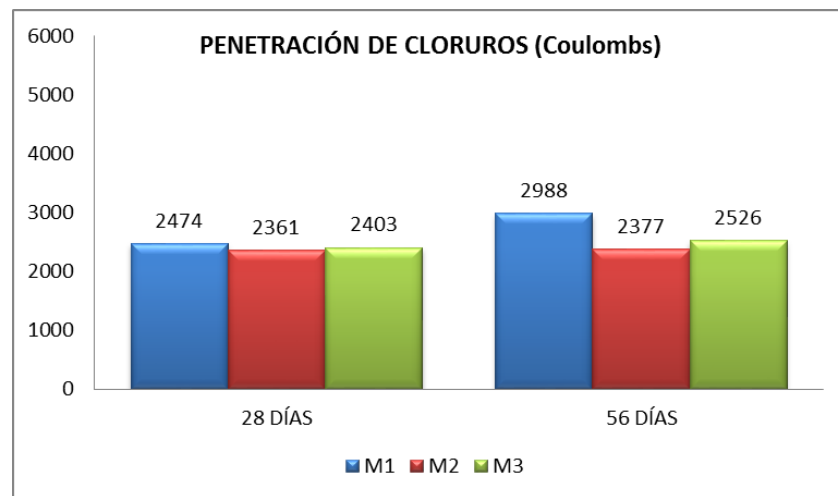
6.5.1 Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros

Los resultados obtenidos de la penetración de cloruros se relacionan en la tabla 17.

Tabla 17. Promedio penetración de cloruros (Coulombs)

EDAD	M1	M2	M3	M1 vs M2	M1 vs M3
28 DÍAS	2474	2361	2403	5%	3%
56 DÍAS	2988	2377	2526	26%	18%

Gráfico 19. Penetración de Cloruros



La carga promedio en coulombs transmitida a los 28 días de edad de curado para los concretos sometidos a la prueba de cloruros, no muestran diferencias porcentuales muy significativas. No obstante, se observa que el concreto convencional M1, fue el que mayor carga transmitió, seguido del concreto reciclado M3 y M2, respectivamente.

A los 56 días la carga promedio en coulombs transmitida en el concreto convencional M1 fue mayor que los concretos M3 y M2 respectivamente, conservando la misma tendencia que lo sucedido a los 28 días.

De acuerdo con lo señalado con la norma ASTM C1202, referente a la clasificación de la permeabilidad del concreto al paso de cloruros, el concreto tanto convencional como reciclado clasifican como concretos de clasificación moderada a la permeabilidad al paso de cloruros, ya que están en el rango de trasmisión de carga entre 2000 y 4000 coulombs.

6.5.2 Carbonatación

La profundidad de carbonatación hallada durante un período de 76 días se relaciona en la Tabla 18. Una vez determinado este avance de carbonatación se determina el coeficiente de carbonatación obtenido en la cámara (K_c), mediante la ecuación $K_c = \sqrt{\frac{P-P_0}{t}}$ donde P_0 es profundidad de carbonatación inicial, y P profundidad de carbonatación final. Posteriormente se determina el coeficiente carbonatación ambiente (K_a), mediante la ecuación, $K_a = K_c \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ donde, K_c es el coeficiente de carbonatación obtenido en la cámara, C_1 , concentración de CO_2 ambiente (0.035%) y C_2 , concentración de CO_2 cámara de carbonatación (4%). Los valores calculados se relacionan en la tabla 18.

Tabla 18. Profundidad de carbonatación inicial y final (mm)

Profundidad de carbonatación inicial (P_0) (28 días colocados en cámara)				Profundidad de carbonatación final (P) (104 días colocados en cámara)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
P (mm)	14.25	21.39	21.73	30.32	30.30	32.61
t (años)	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208	0.208

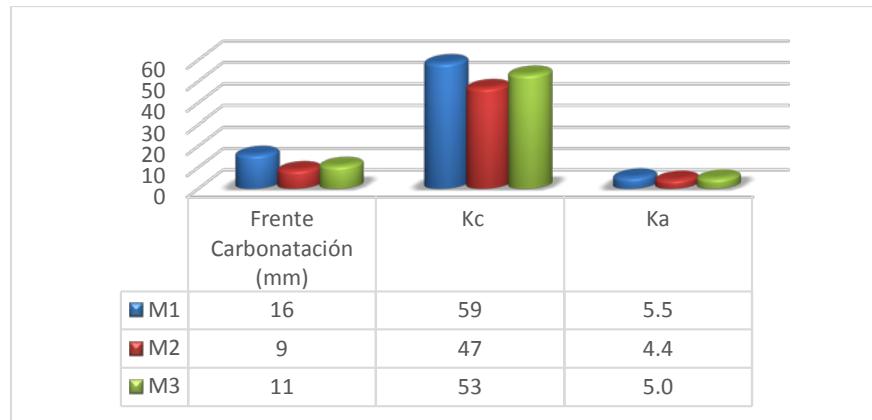
Tabla 19. Constantes de carbonatación acelerada (K_c) y ambiente (K_a)

Coficiente de Exposición (76 días)	M1	M2	M3	M2 vs. M1	M3 vs. M1
Frente Carbonatación Cámara (mm)	16	9	11	-45%	-32%
K_c	59	47	53	-20%	-9%
K_a	5.5	4.4	5.0	-20%	-9%
Calidad del Concreto	REGULAR	BUENA	BUENA		

K_c = Coficiente de Exposición Acelerado

K_a = Coficiente de Exposición Ambiente

Gráfico 20. Comparaciones constantes de carbonatación.



De acuerdo con los datos obtenidos se puede observar que los concretos reciclados M2 y M3, tuvieron menos avance del frente de carbonatación que el concreto convencional M1. Se resalta que el frente de carbonatación del concreto M2, fue un 44% menor que el concreto convencional.

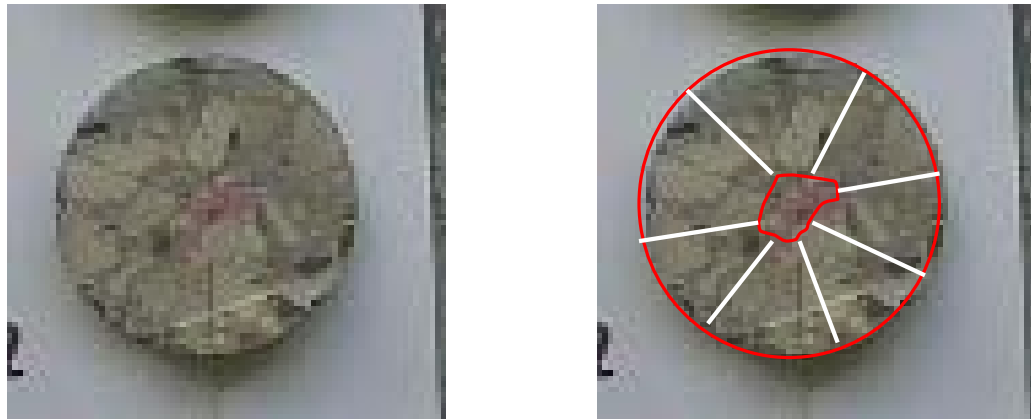
Al observar el coeficiente de carbonatación acelerada (K_c), obtenido en la cámara de carbonatación y el coeficiente de exposición al ambiente (K_a), se puede apreciar que estos coeficientes en el concreto reciclado M2 y M3, fueron menores comparados con el obtenido del concreto convencional M1, 20% y 9%, respectivamente. Se resalta nuevamente que el concreto reciclado M2, tiene menores coeficientes K_c y K_a . De acuerdo con la clasificación que relaciona GÓMEZ J. (2010), el concreto convencional M1, es de calidad regular, entre tanto el concreto reciclado M2 y M3, clasifican como concreto de calidad buena.

Fotografía 20. Cámara de carbonatación, Escuela Colombiana de Ingeniería



La fotografía 22, corresponde a un espécimen que se introdujo en la cámara de carbonatación durante 76 días, en la que se muestra que hay una parte color púrpura y otra incolora; la parte color púrpura significa que no está carbonatada, entre tanto la parte incolora sí lo está.

Fotografía 21. Especimen carbonatado



6.5.3 Tasa de absorción superficial inicial (ISAT)

Los datos obtenidos se relacionan a continuación en las tablas 20 y 21.

Tabla 20. Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m² x s), ISAT (46 días)

TIEMPO	M1 (0%)	M2 (20%)	M3 (40%)
10 minutos	0.39	0.42	0.43
30 minutos	0.22	0.22	0.25
60 minutos	0.16	0.14	0.17

Gráfico 21. Promedio absorción superficial

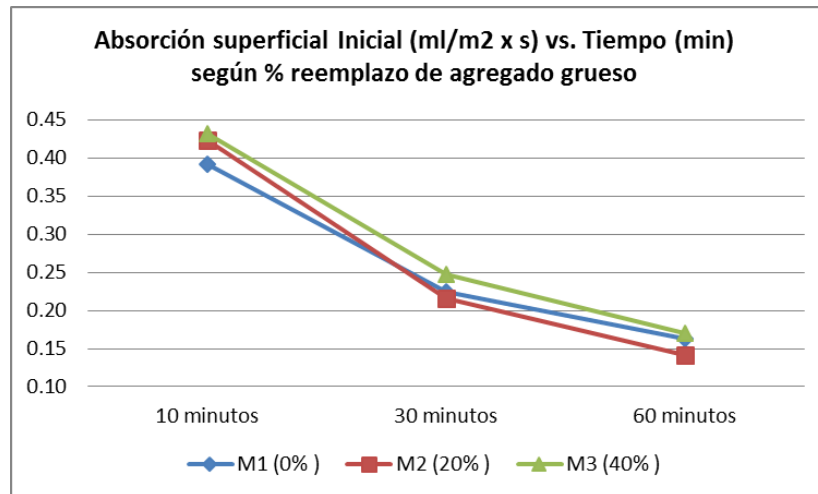
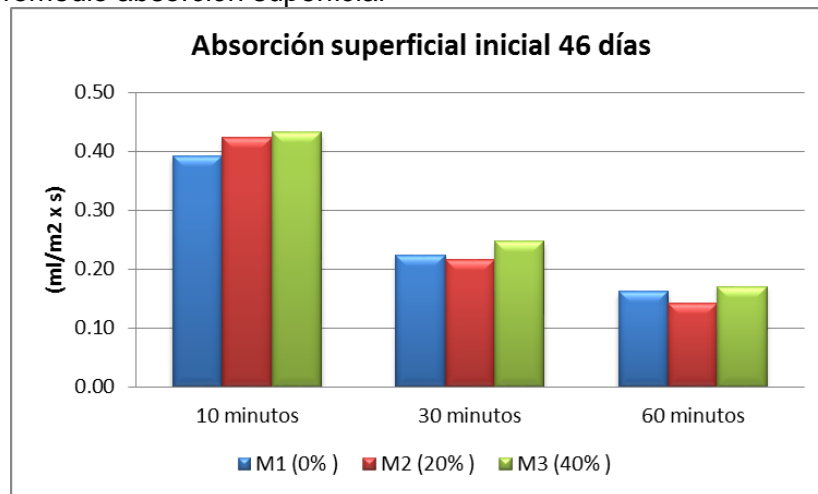


Gráfico 22. Promedio absorción superficial



A los 46 días los valores obtenidos de tasa inicial de absorción en cada uno de los concretos disminuye a medida que pasa el tiempo, 10, 30 y 60 minutos puesto que en los primeros minutos del ensayo el espécimen satura los poros capilares alrededor de la cápsula.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar que el valor de absorción superficial en los primeros 10 minutos del concreto convencional M1 fue el más bajo, seguido de los valores obtenidos de los concretos M2 y M3, respectivamente. Se resalta que en los primeros 10 minutos el concreto convencional M1 tuvo una tasa inicial de absorción 7% menor que M2 y 9% menor que M3. No obstante lo anterior, los resultados

obtenidos a los 30 y 60 minutos, muestran que la tasa inicial de absorción es más baja en el concreto M2, seguida del concreto M1 y M3, respectivamente.

Teniendo en cuenta las categorías de permeabilidad del concreto según la International Atomic Energy Agency, IAEA (GÓMEZ, J., 2010), los concretos M1, M2 y M3 de acuerdo con los datos obtenidos a los 46 días califican como de Permeabilidad de absorción media.

Tabla 21. Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m² x s), ISAT (58 días).

TIEMPO	M1 (0%)	M2 (20%)	M3 (40%)
10 minutos	0.16	0.18	0.20
30 minutos	0.07	0.08	0.14
60 minutos	0.04	0.04	0.05

Gráfico 23. Absorción inicial vs. Tiempo según % reemplazo

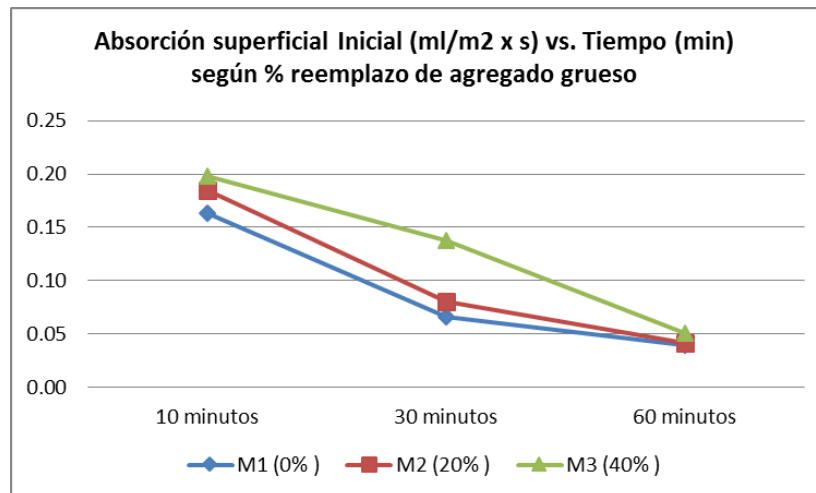
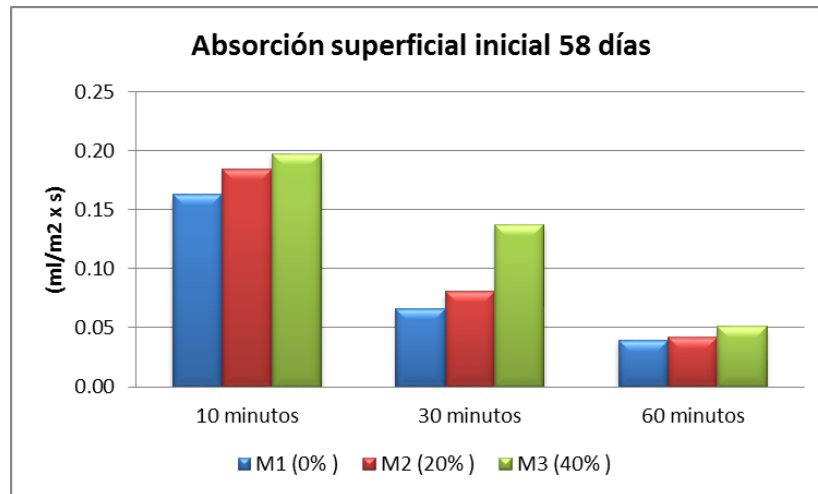


Gráfico 24. Promedio absorción superficial



A los 58 días de edad los valores obtenidos de tasa inicial de absorción en cada uno de los concretos disminuyen a medida que pasa el tiempo, 10, 30 y 60 minutos, ya que como se mencionó anteriormente, en los primeros minutos del ensayo el espécimen satura los poros capilares alrededor de la cápsula, aspecto que se nota en la disminución de los resultados obtenidos en las lecturas realizadas a los 10, 30 y 60 minutos.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar que los valores de tasa inicial de absorción a los 10, 30 y 60 minutos del convencional M1 fueron los más bajos, seguidos de los concretos M2 y M3 respectivamente. Se resalta que en los primeros 10 minutos el concreto convencional M1 tuvo una tasa inicial de absorción 11% menor que M2 y 19% menor que M3.

Teniendo en cuenta las categorías de permeabilidad del concreto según la International Atomic Energy Agency, IAEA (GÓMEZ, J., 2010), los concretos M1, M2 y M3 de acuerdo con los datos obtenidos a los 58 días califican como de Permeabilidad de absorción media.

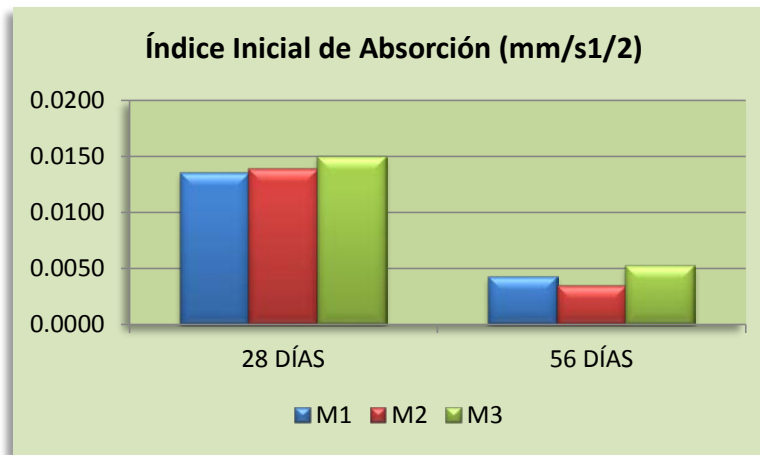
6.5.4 Sortividad

Los datos obtenidos del ensayo de sortividad tanto a los 28 como a los 56 días se relacionan a continuación en la tabla 22.

Tabla 22. Promedio datos obtenidos de sortividad ($\text{mm/s}^{1/2}$)

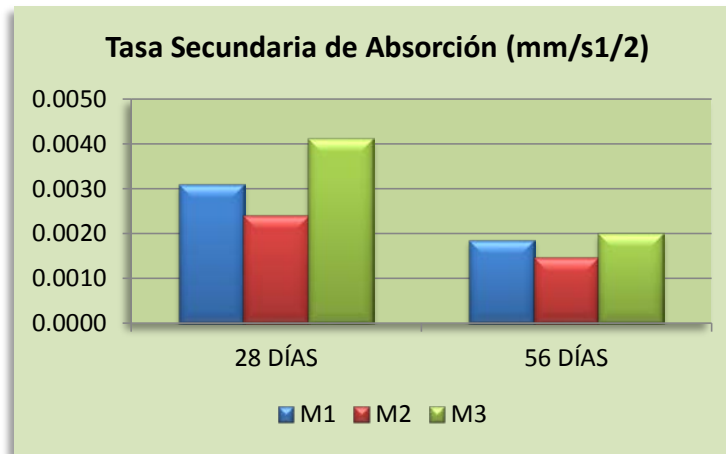
	M1		M2		M3	
	28 días	56 días	28 días	56 días	28 días	56 días
Índice Inicial absorción	0.0136	0.0043	0.0139	0.0035	0.0150	0.0052
Tasa secundaria absorción	0.0031	0.0019	0.0024	0.0015	0.0041	0.0020

Gráfico 25. Índice inicial de absorción.



De acuerdo con los resultados obtenidos a los 28 días, el índice inicial de absorción del concreto convencional M1 fue 2% menor que el concreto reciclado M2 y 9% menor que M3. Significando esto que el concreto M1 fue el que menos agua absorbió. A los 56 días, el índice inicial de absorción del concreto reciclado M2 fue 19% menor que el concreto convencional M1 y 33% menor que el concreto reciclado M3. Significando esto que el concreto M2 fue el que menos agua absorbió. Los resultados obtenidos en este ensayo tienen un comportamiento similar a los obtenidos con el ensayo ISAT a los 10 minutos. De acuerdo con los datos obtenidos tanto en el concreto reciclado como en el convencional, se catalogan como de calidad buena, según la clasificación de calidad de la sortividad de la International Concrete Repair Institute ICRI, como lo menciona GÓMEZ J. (2011).

Gráfico 26. Tasa secundaria de absorción.



A los 28 días, la tasa secundaria de absorción del concreto convencional M2, fue 23% menor que el concreto convencional M1 y 41% menor que el concreto reciclado M3, lo que significa que el concreto M2 fue el que menos agua absorbió. A los 56 días la tasa secundaria de absorción del concreto reciclado M2, fue 21% menor que el concreto convencional M1 y 25% menor que el concreto reciclado M3, lo que muestra que el concreto M2 fue el que menos agua absorbió. Los resultados obtenidos en este ensayo tienen un comportamiento similar a los obtenidos con el ensayo ISAT. GÓMEZ J. (2011), según la clasificación de la sortividad de la International Concrete Repair Institute, ICRI, y de acuerdo con los resultados obtenidos tanto del concreto convencional M1, como reciclado M2 y M3, son clasificados como de calidad buena.

6.5.5 Sulfatos

Se relacionan a continuación los resultados obtenidos para cada uno de los concretos expuestos 68 días en solución de sulfatos.

Tabla 23. Información especímenes antes de introducir en solución de sulfatos

MUESTRA	Peso (g)	DIAMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CILINDRO	
				ÁREA (mm ²)	VOLUMEN (mm ³)
M1	3661	102	201	8091	1623717
M2	3663	102	202	8118	1641279
M3	3494	101	200	7985	1594410

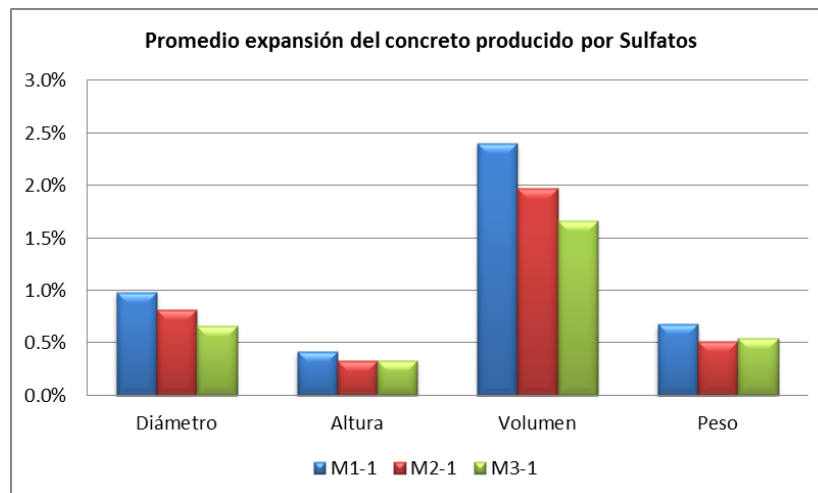
Tabla 24. Especímenes después de introducir 68 días en solución de sulfatos

MUESTRA	Peso (g)	DIAMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CILINDRO	
				ÁREA (mm ²)	VOLUMEN (mm ³)
M1	3686	103	202	8252	1662856
M2	3682	103	203	8252	1673831
M3	3513	102	200	8092	1620957

Tabla 25. Porcentaje de expansión cilindros de concreto

MUESTRA	Peso (g)	DIAMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CILINDRO	
				ÁREA (mm ²)	VOLUMEN (mm ³)
M1	0.68%	0.99%	0.42%	1.98%	2.41%
M2	0.52%	0.82%	0.33%	1.65%	1.98%
M3	0.54%	0.66%	0.33%	1.33%	1.66%

Gráfico 27. Promedio expansión del concreto producido por sulfatos (%).



De acuerdo con los datos obtenidos durante el tiempo de exposición a los sulfatos de los diferentes especímenes se puede observar que no hubo incidencia ni en el concreto convencional ni en el concreto reciclado, dado que las variaciones son despreciables en un 2.5%.

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS

7.1.1. Densidad

La densidad aparente obtenida para el agregado grueso reciclado fue del 2.12 g/cm^3 siendo un 10% menor que la del grueso natural proveniente del municipio de Tabio (Cundinamarca). Este resultado es similar a los obtenidos por BOJACÁ N. (2008), quien obtuvo densidades aparentes para agregados reciclados de 2.07 g/cm^3 y 2.13 g/cm^3 .

La densidad nominal obtenida para el agregado grueso reciclado fue de 2.54 g/cm^3 , presentando una reducción del 2% respecto de la densidad nominal del agregado grueso natural cuyo valor fue de 2.60 g/cm^3 . BOJACÁ N. (2008), obtuvo valores similares de esta propiedad de 2.59 g/cm^3 y 2.52 g/cm^3 . SÁNCHEZ, M. (2004), señala que la densidad para este tamaño de agregado reciclado $1\frac{1}{2}$ (38 mm) es 2.42 g/cm^3 , valor consistente con el obtenido.

La densidad aparente SSS, que se obtuvo para el agregado natural fue de 2.45 g/cm^3 ; entre tanto, el valor obtenido para el agregado grueso reciclado, fue 2.29 g/cm^3 , correspondiendo a una reducción del 6.5%. BOJACÁ N. (2008), obtuvo para agregados reciclados valores de 2.27 g/cm^3 y 2.28 g/cm^3 , lo cual indica consistencia en los datos obtenidos.

7.1.2. Absorción

La absorción del agregado grueso natural fue 3.90 %, mientras que para el agregado grueso reciclado fue del 7.80 %, o sea el doble. SÁNCHEZ, M. (2004), manifiesta que la absorción es una de las propiedades físicas del agregado reciclado que presenta mayor diferencia con el agregado natural. La absorción del agregado reciclado es en todos los casos superior al del agregado natural debido a la elevada absorción del mortero que le queda adherida. LÓPEZ F. (2008), encontró que la absorción del agregado natural oscila entre el 0 % y el 4 %, mientras que para el agregado grueso reciclado del 3.3 % al 13 %. BOJACÁ N. (2008), encontró valores para el agregado reciclado del 7.27 % y el 9.65 %.

7.1.3. Masa Unitaria

La masa unitaria suelta obtenida para el agregado natural en la presente investigación fue 1318 kg/m^3 , que es un 14% mayor que la del agregado reciclado cuyo valor obtenido fue de 1132 kg/m^3 , lo que significa que el agregado reciclado ocupa más volumen que el agregado natural. BOJACÁ N. (2008), obtuvo para el agregado reciclado valores de masa unitaria suelta de 1100 kg/m^3 y 1110 kg/m^3 , diferencias no mayores al 2% del obtenido, lo cual permite establecer que los resultados obtenidos son consistentes con la bibliografía consultada.

La masa unitaria compacta obtenida para el agregado natural fue de 1474 kg/m^3 , para el agregado reciclado fue 1282 kg/m^3 , o sea una reducción del 13 % en relación con el agregado natural. Al determinar la variación de la masa unitaria compacta respecto a la masa unitaria suelta tanto del agregado grueso natural como del reciclado, se obtuvo para el agregado grueso natural una variación del 11.8% y para el agregado reciclado el 13.3%, significando esto que el grado de acomodamiento de las partículas del agregado natural es mucho mejor que las del agregado reciclado cuando se somete a vibración, y por esta razón el agregado grueso natural tuvo mayor masa unitaria. BOJACÁ N. (2008), obtuvo valores de esta propiedad física para el agregado reciclado de 1280 kg/cm^3 y 1260 kg/cm^3 , valores similares al obtenido.

7.1.4 Coeficiente de Forma

El coeficiente de forma obtenido para el concreto reciclado fue 0.24, este valor es consistente con los obtenidos por ASTUDILLO B. (2003), donde encontró para agregado reciclado de planta un coeficiente de forma de 0.23 y para agregado reciclado de laboratorio 0.18. Algunos estudios han permitido concluir que por lo general el coeficiente de forma del agregado grueso reciclado supera el valor de 0.20.

7.1.5. Desgaste Máquina de Los Ángeles

El valor obtenido de resistencia al desgaste en la Máquina de los Ángeles en el agregado grueso reciclado fue del 40.5% en la presente investigación, lo cual es muy similar a los estudios relacionados por LÓPEZ F. (2008), donde se encuentran valores de desgaste entre el 29.5% y el 38.9%. No obstante lo anterior, BOJACÁ N. (2008) obtuvo desgaste del agregado grueso reciclado del 45%. La Comisión 2 Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón reciclado”, establece que el valor del coeficiente de los Ángeles del agregado reciclado puede situarse entre 25% y el 42%, dependiendo, entre otros factores del tamaño de la partícula y la calidad del concreto original así como del propio coeficiente de los Ángeles del agregado natural que contenga. LÓPEZ F. (2008), mencionó que la razón para que la resistencia al desgaste en la Máquina de los Ángeles en agregados reciclados presente valores mayores al del agregado natural se debe a que en este ensayo se produce pérdida de peso tanto del agregado reciclado como la eliminación de su mortero adherido. De otro lado, se ha observado que el concreto del cual procede el agregado reciclado influye en el valor obtenido en el ensayo.

El valor obtenido de resistencia al desgaste en el ensayo de Micro Deval fue del 31% en el agregado grueso reciclado, un 14.5% más que el obtenido en el agregado grueso natural, mayor que el diferencial del 10% obtenido en la Máquina de los Ángeles debido a que el ensayo de Micro Deval se hace en presencia de agua.

7.2 CONCRETO EN ESTADO FRESCO

En la presente investigación y con el objetivo de obtener una mejor trabajabilidad de la mezcla de concreto se presaturó el agregado reciclado; este aspecto es consistente con lo recomendado por SÁNCHEZ M. (2004), quien en su investigación manifiesta que la utilización de agregado grueso reciclado en condiciones de presaturación, produce un efecto favorable en la consistencia del concreto reciclado, obteniéndose en la mayoría de los casos consistencias líquidas y fluidas cuando se utiliza al menos un 20% de agregado reciclado en el ensayo del cono de Abrams.

El contenido de aire medido en el concreto fresco en la presente investigación fue para M1, 1.0%; M2, 1.65% y para M3, 1.5%. SÁNCHEZ M. (2004), reporta que el contenido de aire ocluido (aire atrapado) en el concreto reciclado cuando se utiliza agregado presaturado es muy similar al del concreto de control incluso para porcentajes de sustitución del 100%, y ha encontrado valores en concretos convencionales entre 0,9% y 2.0%. Entre tanto, para concretos reciclados se ha encontrado entre el 0.7% y 2.5%, permitiendo observar que los resultados obtenidos tienen concordancia con los referidos en la bibliografía sobre el tema.

7.3 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

7.3.1 Resistencia a compresión

El concreto reciclado M2, cuyo reemplazo de agregado grueso fue del 20%, tuvo mayor resistencia a la compresión que el concreto convencional M1, aspecto que se hace más significativo en la medida que avanza el tiempo de curado dado que a la edad de 3 días el concreto M1 y M2 tuvieron resistencias similares. Los resultados obtenidos en la presente investigación son consistentes con algunos estudios relacionados por LÓPEZ F. (2008), quien expresa que la evolución de la resistencia a la compresión en el concreto reciclado durante las cuatro primeras semanas es similar a la del concreto control, pero algunos estudios han indicado una tendencia de los concretos reciclados a presentar resistencias a la compresión superiores a la de control a partir de los 28 días, señalando que uno de los aspectos para que esto suceda es la dependencia de la resistencia del concreto triturado o de origen utilizado como agregado.

No obstante lo anterior, los resultados obtenidos difieren con otras investigaciones que han concluido que la resistencia a la compresión en concretos reciclados disminuye respecto a las del concreto convencional, manteniendo en ambos la misma relación A/C, siendo la disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de agregado sustituido. LÓPEZ F. (2008), en revisión bibliográfica encontró estudios que señalan que cuando el porcentaje de sustitución no supera el 30 %, las pérdidas de resistencia son pequeñas, cuando la sustitución es del 50 % la resistencia oscila entre una ganancia del 5 % y pérdidas de hasta 16 %, cuando dicho porcentaje aumenta al 100 % las pérdidas de resistencia oscilan entre el 1% y el 23 %. SANCHEZ, M. (2004), reporta que se ha definido el 20%

como límite de sustitución del agregado grueso natural por agregado reciclado sin que se vean afectadas las características del concreto endurecido, a partir de este límite se observa una disminución en los valores de estas características.

7.3.2 Módulo de elasticidad

Según los datos obtenidos el módulo de elasticidad a los 3 y 28 días tiene tendencia a disminuir en la medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado grueso reciclado en el concreto, aspecto que cambia a los 56 y 100 días donde el concreto reciclado tuvo mayor módulo de elasticidad que el concreto convencional; no obstante lo anterior, se puede observar que el concreto M2, con 20% de reemplazo de agregado grueso reciclado presenta un comportamiento en cuanto a módulo de elasticidad similar al del concreto convencional M1. LÓPEZ F. (2008), destacó que concretos reciclados con porcentajes de sustitución del agregado grueso hasta del 30% presentan una disminución del módulo de elasticidad entre el 4% y el 10%, con porcentajes de sustitución hasta del 50% del agregado grueso el módulo de elasticidad puede llegar hasta una disminución del 20%, si la sustitución es del 100% la disminución puede llegar hasta el 50%. SÁNCHEZ M. (2004), encontró que para sustituciones del 20% el módulo de elasticidad disminuye aproximadamente un 10% respecto a un concreto de control con la misma dosificación, mientras que para sustituciones del 50% y 100% los descensos están entre el 20% y 40% respectivamente.

7.3.3 Módulo de rotura (MR)

Los resultados obtenidos muestran que el concreto M2, cuyo reemplazo de agregado grueso fue del 20%, tuvo un módulo de rotura (MR) similar al del concreto convencional, y mayor que el concreto M3. MALHOTRA (1977) encontró en sus investigaciones que la resistencia a la flexión del concreto reciclado, oscila entre un 80% y 100% del concreto convencional. ALDERETE, N. (2010), en su investigación Ensayo a Flexión de Vigas de Concreto con Incorporación de Agregados Reciclados, concluye en principio el buen desempeño que presentaron los concretos elaborados con diferentes porcentajes de agregado reciclado, teniendo en cuenta que los resultados de resistencia a flexión no difieren significativamente con respecto a la muestra patrón. No obstante, en su mismo

estudio se observó que la resistencia a la flexión del concreto reciclado para reemplazos de 25% y 50%, superaron levemente la resistencia de la muestra patrón.

7.3.4 Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)

Los resultados obtenidos del concreto tanto convencional como reciclado calificaron como concretos buenos de acuerdo con la clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica. SOLÍS R., et. Al. (2004). Los datos muestran que al igual que lo ocurrido con la resistencia a la compresión, a mayores edades, el concreto reciclado M2 tiene mayor velocidad de pulso ultrasónico que M1 y M3, significando esto que M2 presenta un mejor comportamiento en cuanto a resistencia. De otra parte, los valores indican que existe correlación con los valores obtenidos en la resistencia a la compresión, lo cual permite validar entre sí, los resultados que se obtuvieron. La velocidad de pulso ultrasónico se ve afectada en la medida en que aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado grueso. Contrario al comportamiento obtenido para el concreto reciclado M2, el concreto M3 cuyo porcentaje reemplazo de agregado grueso fue del 40%, tuvo una menor velocidad de pulso ultrasónico permitiendo intuir que el concreto con un 20%, de reemplazo de agregado grueso tiene un comportamiento similar en cuanto a resistencia al concreto convencional. SÁNCHEZ, M. (2004), comenta que la velocidad de las ondas ultrasónicas son menores en concreto reciclado y disminuye a medida que aumenta el contenido de agregado reciclado.

7.4 DURABILIDAD

7.4.1 Permeabilidad a cloruros

Se observó que el concreto convencional M1, es el que transmite mayor carga seguido del concreto reciclado M3 y M2 respectivamente. Por lo anterior, las diferencias porcentuales muestran que la permeabilidad al paso de cloruros tanto en el concreto convencional como reciclado, son similares. De acuerdo con lo señalado por GÓMEZ C. (2010), referente a la clasificación de la permeabilidad del concreto al paso de cloruros, el concreto tanto convencional como reciclado, clasifican como concretos de clasificación moderada a la permeabilidad al paso de cloruros. No obstante estos datos obtenidos contradicen los

estudios de LÓPEZ, F. (2008), donde menciona que la penetración del ión cloruro en el concreto reciclado es mayor que la del concreto convencional, efecto que aumenta en la medida en que disminuye la calidad del agregado reciclado. DI MAIO, A.A., et. Al. (2004) encontraron que el proceso de difusión de cloruros en el concreto reciclado en ambiente marino es similar a la del concreto convencional, incluso para porcentajes de sustitución del 75%. La Comisión 2 “Grupo de trabajo 2/5 “Hormigón reciclado” (2006), expresó que aunque no se han localizado estudios que evalúen el comportamiento frente a la penetración de cloruros de concretos con reducidos porcentajes de agregado grueso reciclado (20%), es previsible que sea prácticamente similar al de los concretos convencionales.

7.4.2 Carbonatación

Los datos obtenidos en la presente investigación muestran que en el frente de carbonatación, el coeficiente de exposición acelerada (K_c) y el coeficiente de exposición al ambiente (K_a), fueron menores en el concreto reciclado que en el concreto convencional. De acuerdo con GÓMEZ J. (2010), el concreto convencional M1, es de calidad regular, entre tanto el concreto reciclado M2 y M3, clasifican como concreto de calidad buena, siendo el concreto con reemplazo de agregado grueso del 20% (M2) el que mejor se comportó. El frente de carbonatación para los concretos reciclados M2 y M3, estuvo por debajo 44% y 31%, respectivamente comparados con el concreto convencional M1. Los datos obtenidos van en contravía de los obtenidos en diferentes investigaciones. KASAI, Y. et. Al. (1988) Y TERANISHI, K. (1998), obtuvieron incrementos de la profundidad del frente de carbonatación para concretos reciclados, entre el 20% y 50% con respecto a la del concreto de referencia. No obstante lo anterior, encontraron para porcentajes de sustitución hasta del 30% en las fracciones gruesas que apenas se obtuvieron diferencias entre los concretos reciclados y convencionales. HANSEN T., ET. AL. (1992) en su trabajo del Building Contractors Society of Japan (BCSJ), pudieron observar valores de profundidad del frente de carbonatación un 65% mayores en el concreto con agregados reciclados.

7.4.3 ISAT

De acuerdo con los valores obtenidos, tanto en el concreto reciclado como el convencional, a medida que pasa el tiempo va disminuyendo la tasa inicial superficial de absorción, aspecto que era de esperarse ya que en los primeros minutos del ensayo el espécimen satura los poros capilares alrededor de la cápsula. En los ensayos realizados para edades de 46 y 58 días el concreto convencional M1, fue el que tuvo la menor tasa inicial de absorción seguido del concreto reciclado M2 y M3, respectivamente. De acuerdo con estos resultados en la medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado grueso reciclado también aumenta la tasa inicial de absorción. De otro lado, si se comparan las lecturas de tasas iniciales de absorción a los 10 minutos con las de los 12 días transcurridos entre los dos ensayos (46 y 58 días), se observa una reducción en la tasa inicial de absorción en promedio de 55%. Según las tasas de absorción obtenidas los concretos calificaron como de absorción media. Los porcentajes de reducción de la tasa inicial de absorción de M1 comparadas con M2 y M3 en el primer ensayo fueron del 7% y 9% y el segundo ensayo del 11% y 19%, respectivamente. LÓPEZ F. (2008), encontró que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado grueso reciclado en la fabricación de concreto, aumenta el porcentaje de permeabilidad entre el 15% y el 70%. Los datos obtenidos son consistentes en el sentido de que la absorción aumenta en la medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo de agregado grueso reciclado, no obstante en un porcentaje mucho menor que en la bibliografía señalada.

7.4.4 Sortividad

De acuerdo con los datos obtenidos a los 28 días el concreto convencional M1, fue el que menor índice de absorción tuvo seguido del concreto reciclado M2 y M3 respectivamente, la diferencia con M1 fue del 2%, o sea muy similar. A los 56 días el concreto reciclado M2, fue el que menor índice de absorción tuvo seguido de M1 y M3, respectivamente, la diferencia con M1 fue del 19%, sugiriendo esto que el concreto con 20% de reemplazo (M2), tiene mejor comportamiento que el concreto convencional. GÓMEZ J. (2011), según la clasificación de la sortividad de la International Concrete Repair Institute, ICRI, y de acuerdo con los resultados obtenidos los concretos clasificaron como de calidad buena.

Nuevamente sugiere el concreto reciclado con porcentaje de reemplazo de agregado del 20% como el adecuado para obtener buen comportamiento ante la absorción.

7.4.5 Sulfatos

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que no hubo diferencias en los concretos tanto convencional como reciclado, aspecto este que es consistente con LÓPEZ F. (2008), quien en su investigación observó un comportamiento similar entre el concreto reciclado y el convencional especialmente cuando el porcentaje de sustitución de agregado grueso no supera el 30%, no obstante, menciona en su estudio que debido a la mayor permeabilidad del concreto reciclado, la penetración de sustancias con alto contenido de sulfatos susceptibles de atacar al concreto es más fácil que en el concreto convencional.

8. APLICACIÓN PRÁCTICA

Con el objetivo de observar el comportamiento del concreto reciclado se fabricaron cuatro losas de concreto a escala para el curso de Comportamiento Plástico de Estructuras de Concreto del posgrado, cada una con dimensiones de 2.0 x 0.90 x 0.03 m, así:

- 2 losas con concreto convencional con refuerzo en una dirección y dos direcciones
- 2 losas con concreto reciclado con reemplazo del 20% de agregado grueso con refuerzo en una dirección y dos direcciones.

Es importante señalar que se utilizaron los mismos materiales y el concreto fue dosificado teniendo en cuenta el mismo diseño de mezcla que el realizado en la presente investigación, esto con el fin de obtener información comparable.

8.1 ENSAYO DE LOSAS DE CONCRETO RECICLADO

Se fabricaron cuatro placas de concreto reforzado así:

1. Dos (2) losas con refuerzo en una dirección: una fundida con concreto convencional, 0% de agregado grueso reciclado (CC1) y otra de concreto reciclado con reemplazo del 20% de agregado grueso reciclado (CR1).
2. Dos (2) losas con refuerzo en dos direcciones: una fundida con concreto convencional, 0% de agregado grueso reciclado (CC2) y la otra de concreto reciclado con reemplazo del 20% de agregado grueso reciclado (CR2).

Se relacionan a continuación otras características de las losas:

Elementos: Placas de concreto reforzado apoyadas sobre tres bordes.

Dimensiones: 2.00 x 0.90 x 0.03 m.

Bordes apoyados: Los dos cortos y uno largo.

Ancho de apoyos: 6.4 cm.

Armaduras:

- Placa Tipo 1, reforzada en una dirección (lado mayor): Grafileres \varnothing 6 mm, c/15 cm.
- Placa Tipo 2, reforzada en dos direcciones: malla de \varnothing 3 mm, c/15 cm.

Características de los materiales:

✚ Refuerzo:

Malla \varnothing 4 mm	$f_y=614$ MPa	$F_u=672$ MPa
Grafileres \varnothing 6 mm	$f_y =592$ MPa	$F_u=662.5$ MPa

✚ Concreto (resistencia del concreto día del ensayo en cilindros de 100 x 200 mm):

Convencional (0% reemplazo agregado grueso):

$$f'_c=18.4 \text{ MPa}$$

$$E_c=15103 \text{ Mpa}$$

$$\text{Peso Unitario: } 2213 \text{ kg/m}^3$$

Reciclado (20% reemplazo agregado grueso):

$$f'_c =19.9 \text{ MPa}$$

$$E_c =15608 \text{ MPa}$$

$$\text{Peso Específico: } 2190 \text{ kg/m}^3$$

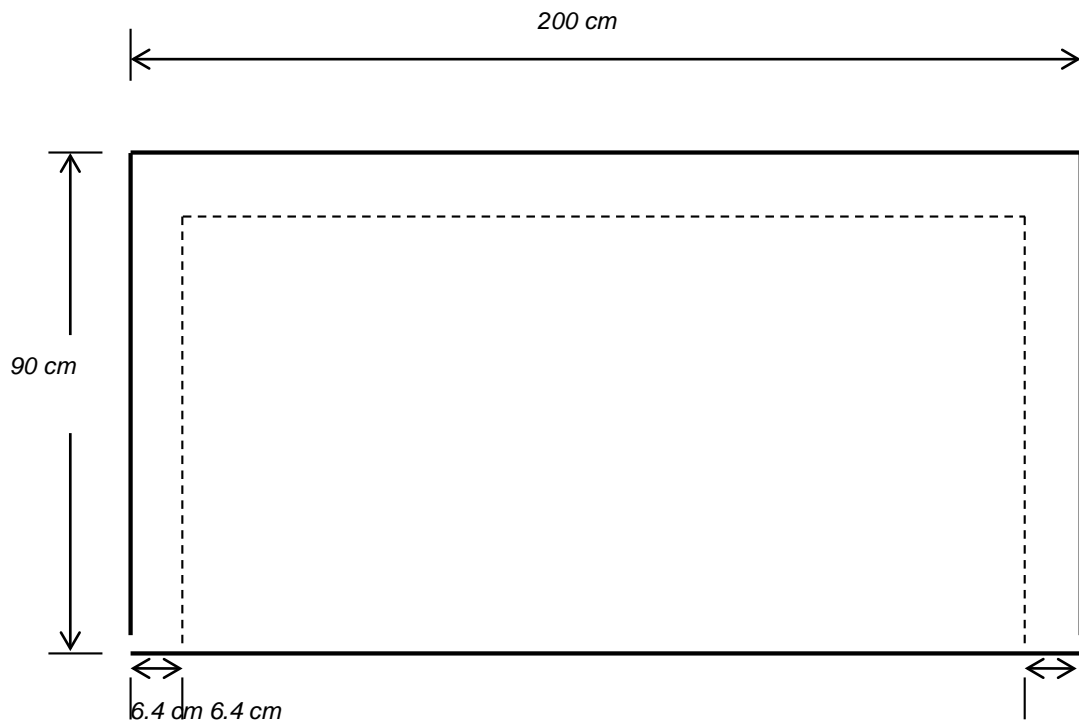
Las resistencias de los materiales utilizados fueron determinadas en el Laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería. La resistencia del concreto, corresponden al promedio de 4 cilindros ensayados. La resistencia a la compresión del concreto convencional se realizó a los 12 días de edad, y para el concreto reciclado a los 13 días.

El análisis teórico de las placas se realizó mediante el método de **ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS DE FLUENCIA MEDIANTE EL “MÉTODO DEL TRABAJO VIRTUAL”**.

En los gráficos 28, 29 y 30, se muestran la disposición geométrica de las placas con su respectivo refuerzo.

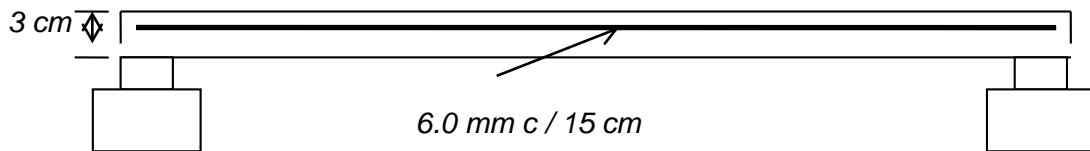
VISTA EN PLANTA PLACA

Gráfico 28. Geometría Placa



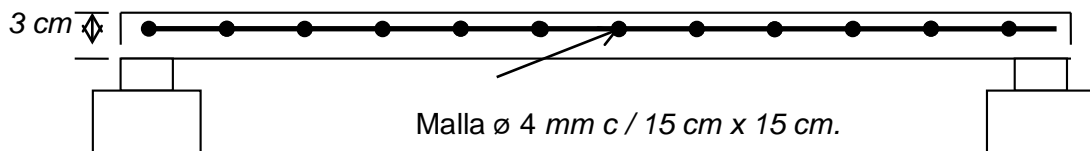
PLACA TIPO 1

Gráfico 29. Placa reforzada en una dirección



PLACA TIPO 2

Gráfico 30. Placa reforzada en dos direcciones



8.2 PROCEDIMIENTO

Para cada una de las placas se realizaron lecturas en el deformímetro mecánico colocado en la mitad del borde libre de la placa en la medida que se incrementaba la carga con incrementos de 20 kg, hasta la falla del elemento. Para el incremento de carga se esparció grava gruesa sobre la placa con el objeto de simular una carga uniformemente repartida hasta la falla. Posteriormente se recuperaron los pedazos de placa con el objetivo de obtener un esquema de las líneas de fluencia.

Una vez obtenidas las líneas de falla se escogió la que más se ajustaba a los tipos de fluencia para este tipo de losas apoyadas en tres lados (gráficos 31 y 32). Para el cálculo de las cargas teóricas de las diferentes losas se usaron las dimensiones de las líneas de fluencia b y c medidas en las placas una vez fallaron, al igual que la posición real del refuerzo dentro de la losa.

Gráfico 31. Patrón de falla escogido

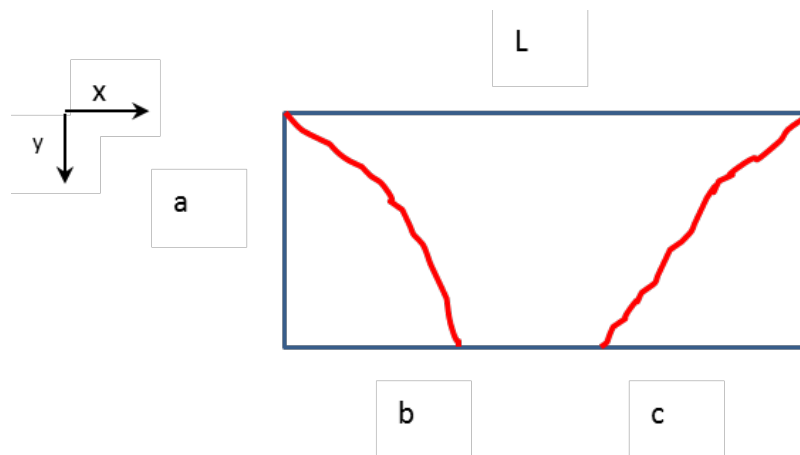
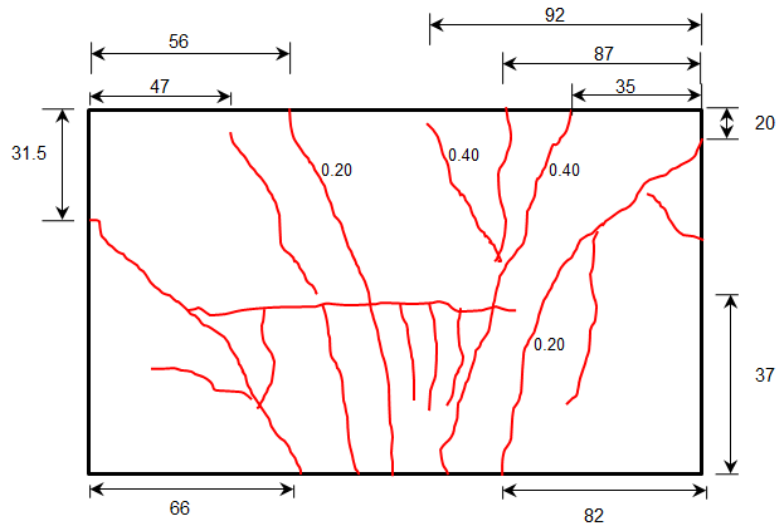


Gráfico 32. Esquema líneas de fluencia

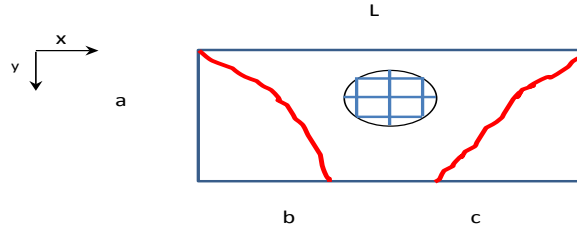


8.3 RESULTADOS OBTENIDOS

En el gráfico 33 se muestra el cálculo de una de las losas y en la tabla 26, se relacionan los resultados obtenidos.

Gráfico 33. Determinación de carga teórica

LOSA 2. CONCRETO RECICLADO DOS DIRECCIONES



Trabajo externo

$$W_{ext} = W \left(\frac{a * b}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{a * c}{2} * \frac{1}{3} * 2 + \frac{(L - b - c) * a}{2} \right)$$

Trabajo Interno

$$W_{int} = \left(\frac{ma}{b} + \frac{ma}{c} + \frac{mL}{a} \right)$$

Trabajo externo = Trabajo Interno

$$w = \frac{\left(my \frac{a}{b} + my \frac{a}{c} + mx \frac{L}{a} \right)}{\frac{a * b}{3} + \frac{a * c}{3} + \frac{(L - b - c) * a}{2}}$$

MOMENTO EJE Y		
Malla	3	mm
Área Malla	0.07	cm ²
Ancho	90	cm
Separación	15	cm
No. Grafiles	6	
As=	0.42	cm ²
Cuantía=	0.0020	
b=	100	cm
d=	2.11	cm
Fy=	6140	kg/cm ²
f'c=	199	kg/cm ²
Φ=	1	
Mn=	5294	kg-cm/m
	52.94	kg-m/m

MOMENTO EJE X		
Malla	3	mm
Área grafil	0.07	cm ²
Largo	200	cm
Separación	15	cm
No. Grafiles	13.33	
As=	0.94	cm ²
Cuantía=	0.0045	
b=	100	cm
d=	2.11	cm
Fy=	6140	kg/cm ²
f'c=	199	kg/cm ²
Φ=	1	
Mn=	11217	kg-cm/m
	112.17	kg-m/m

L (m)	a (m)	b (m)	c (m)	My (kg-/m)	Mx (kg-/m)	W (kg/m)
1.873	0.837	0.9	0.9	52.94	112.17	656.55
1.873	0.837	0.8	0.8	52.94	112.17	645.83
1.873	0.837	0.7	0.7	52.94	112.17	642.10
1.873	0.837	0.6	0.6	52.94	112.17	647.26
1.873	0.837	0.5	0.5	52.94	112.17	665.08
1.873	0.837	0.4	0.4	52.94	112.17	703.38
1.873	0.837	0.3	0.3	52.94	112.17	780.83
1.873	0.837	0.2	0.2	52.94	112.17	953.76
1.873	0.837	0.1	0.1	52.94	112.17	1504.67
1.87	0.837	0.60	0.88	52.94	112.17	650.36
						1052.38

LOSA 2. CONCRETO RECICLADO DOS DIRECCIONES

Real	720	400 kg/m ²
Teórico	723	401 kg/m ²
		0.4%

Tabla 26. Resumen cargas teóricas de falla estimadas

TIPO DE REFUERZO	CONCRETO CONVENCIONAL		CONCRETO RECICLADO		
	W (kN/m ²)	W (kN)	W (kN/m ²)	W (kN)	
Una dirección	5.9	10.6	4.6	8.2	29%
Dos direcciones	3.9	7.1	4.0	7.2	-2%

Gráfico 34. Comparación cargas teóricas (kN/m²)

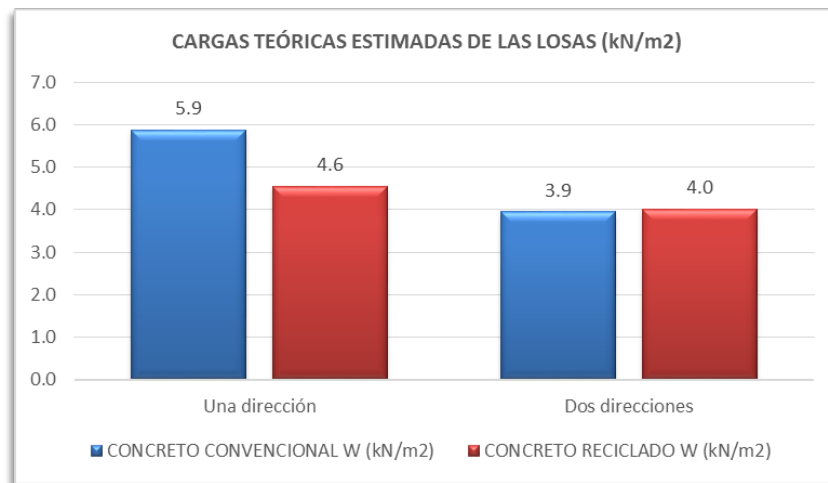
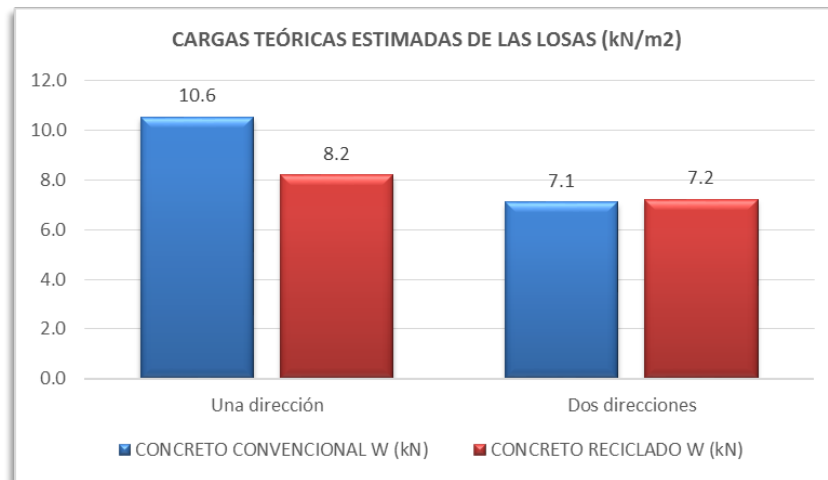


Gráfico 35. Comparación cargas teóricas (kN/m²)



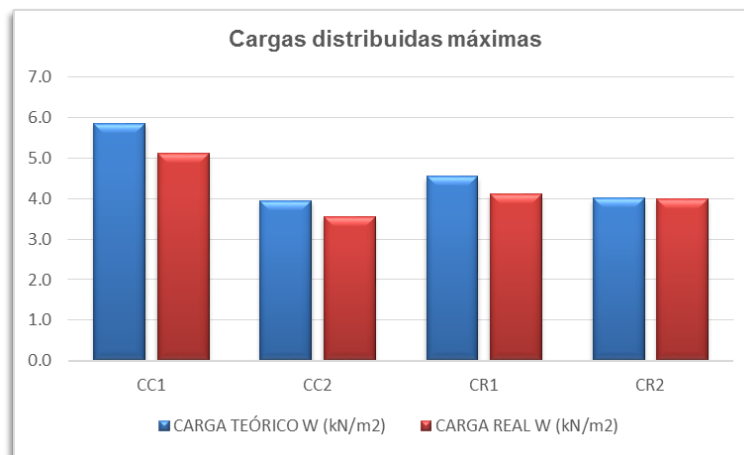
De acuerdo con los resultados obtenidos, las cargas máximas teóricas determinadas por el método de las líneas de rotura fueron mayores que las obtenidas en el laboratorio en los siguientes porcentajes: placa de concreto reciclado con refuerzo en una dirección 11%, placa de concreto reciclado con refuerzo en dos direcciones 0.4%, placa de concreto convencional con refuerzo en una dirección 15%, y placa de concreto convencional con refuerzo en dos direcciones 11%.

De otro lado, comparados los resultados de las cargas teóricas estimadas para las losas tanto de concreto convencional como reciclado se puede observar que las losas de concreto convencional con refuerzo en una dirección soporta un 29% más de carga que la losa en concreto reciclado. Caso contrario ocurre en las losas de concreto con refuerzo en dos direcciones, donde la losa de concreto convencional soporta 2% menos de carga que la losa de concreto reciclado.

Tabla 27. Resumen cargas teóricas de falla estimadas

TIPO DE LOSA	CARGA TEÓRICO W (kN/m ²)	CARGA REAL W (kN/m ²)	
CC1	5.9	5.1	15%
CC2	4.0	3.6	11%
CR1	4.6	4.1	11%
CR2	4.0	4.0	0%

Gráfico 36. Cargas distribuidas máximas

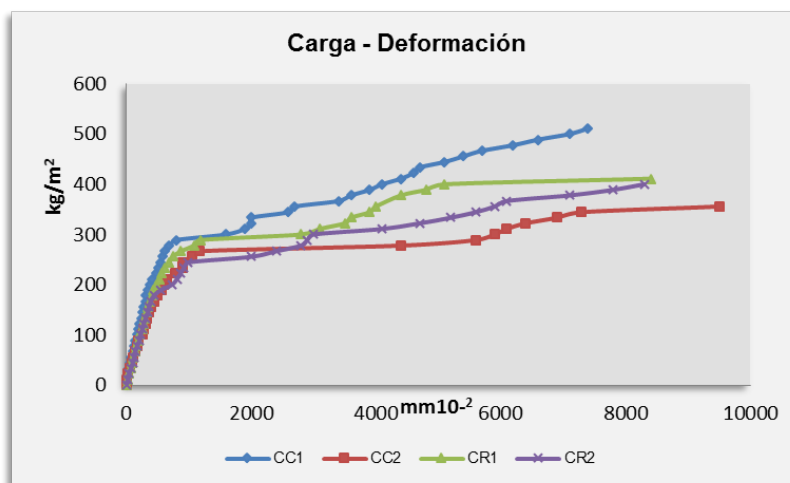


De acuerdo con los resultados de la tabla 27, se puede observar que las cargas máximas determinadas por el método de las líneas de rotura de las diferentes losas, fueron mayores que las halladas en laboratorio en los siguientes porcentajes: Losa de concreto convencional con refuerzo en la dirección más larga CC1, 15%. Losa de concreto convencional con refuerzo en las dos direcciones CC2 11%. Losa de concreto reciclado con refuerzo en la dirección más larga CR1, 11%. La losa de concreto reciclado con refuerzo en las dos direcciones no tuvo diferencia porcentual.

Tabla 28. Cargas y deformaciones máximas en losas

TIPO DE LOSA	CARGA MÁXIMA (kN/m ²) LABORATORIO	DEFORMACIÓN (mm)
CR1	4.1	84
CR2	4.0	83
CC1	5.1	74
CC2	3.6	95

Gráfico 37. Carga vs. Deformación de placas



Se puede observar en el gráfico 37, que las cargas soportadas y las deformaciones obtenidas en laboratorio, tanto en la placa de concreto reciclado con refuerzo en una dirección CR1 y refuerzo en dos direcciones CR2, fueron muy similares. La placa de concreto convencional CC1, con refuerzo en una dirección, aunque soportó más carga su

deformación fue menor comparada con la placa de concreto convencional con refuerzo en las dos direcciones CC2.

Al comparar las placas tanto en una dirección como en dos direcciones de concreto convencional se puede observar que la de concreto convencional con refuerzo en una dirección soportó más carga pero las deformaciones fueron muy similares.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que la utilización de concreto triturado de buena calidad como remplazo parcial de agregado grueso natural:

El agregado reciclado proveniente de la trituración de concreto comparado con el agregado natural, presenta mayor humedad de absorción, menor densidad (aparente y nominal), menor coeficiente de forma y menor resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles y en el ensayo Micro Deval, lo cual coincide con los autores consultados.

Remplazos de hasta 40% de agregado grueso reciclado por agregado natural no producen deterioro de las propiedades mecánicas del concreto; la resistencia a compresión de concreto con 40% de remplazo fue similar a la de la muestra de control, mientras que la de concreto con 20% de remplazo fue ligeramente superior. Los resultados de módulo elástico no son concluyentes, pero se puede afirmar que no hay disminución de éste. En flexión, el concreto con 20% de remplazo tuvo un módulo de rotura similar a la muestra control, mientras que hubo una disminución de un 10% para concreto con 40% de reemplazo.

En cuanto a ensayos de durabilidad, se encontró que el remplazo de agregado reciclado no produjo deterioro en las propiedades y por el contrario, mejoraron ligeramente; en el ensayo de permeabilidad a cloruros a 28 días, la permeabilidad del concreto con agregado reciclado fue similar a la del concreto control, mientras que a 56 días, el concreto con 40% de remplazo tuvo una permeabilidad 18% inferior a la del concreto de control. En cuanto a carbonatación, la resistencia del concreto con agregado reciclado fue ligeramente superior a la del concreto control. Finalmente, los ensayos ISAT y de sortividad dieron resultados similares.

Los resultados obtenidos en la elaboración de las losas fabricadas con concreto reciclado, permiten sugerir su uso en este tipo de elementos estructurales dada las características similares del concreto reciclado con el concreto convencional.

El concreto reciclado en Colombia podría convertirse, al igual que en otros países, en una alternativa para ser utilizado en obras civiles, impactando positivamente en el medio

ambiente dada la proyección de generación de escombros que se prevé, y en una posible reducción de costos de estos materiales de la construcción, generando una nueva cultura del reciclaje cuando se observen los beneficios del aprovechamiento de los residuos de la construcción.

Se recomienda para futuras investigaciones la compilación de información obtenida, tanto por la Escuela Colombiana de Ingeniería, como en otras universidades con el fin de generar guías de diseño que contemplen el uso de agregado reciclado. De otro lado, se recomienda la construcción en concreto reciclado de elementos estructurales y no estructurales en proyectos reales para monitorearlos y verificar su desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

AJDUKIEWICZ, A; KLISZCZEWICZ, A; Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites* 24; pp. 269-279. 2002

ALDERETE, N. Tesis de Becarios Ensayo a Flexión de Vigas de Hormigón con Incorporación de Agregados Reciclados. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina. 2010

ARRIAGA, L. Trabajo de Grado de Especialización Utilización de Agregado Grueso de Concreto en Elementos Estructurales de Concreto Reforzado. Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito. Bogotá. 2013

ASTUDILLO, B. Análisis de los componentes en hormigones preparados con áridos reciclados. [en línea]. 2003. Madrid. Disponible en Internet: <http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/ASTUDILLO-Beatriz-IV-IBERMAC.pdf>

BARRA, M. (1996), Estudio de la durabilidad del hormigón reciclado en su aplicación como hormigón armado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 1996

BOJACÁ, N. Trabajo de Grado de Especialización Concreto Sostenible como Alternativa Estructural, Ambiental y Económica en la Construcción de Obras Civiles. Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito. Bogotá. 2008

CAMPAGNOLI, S., LÓPEZ, C. El Ensayo Micro Deval. Sus Características y Ámbitos de Aplicación. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito*. No.68. Bogotá, Colombia. 2007

CAMPAGNOLI, S., LÓPEZ, C. Caracterización de Agregados Pétreos con el Ensayo Micro Deval. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito*. No.69. Bogotá, Colombia. 2008

DI MAIO, A.A.; ZEGA, C; TAUS, V.; TRAVERSA, L.P.: Durability of Recicled Concretes. INCERC. Comportarea in Situ a Constructiilor. Conferinta Natianala. Bucarest, 2004.

EVANGELISTA, L; DE BRITO, J; Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites 29; pp. 397-401. 2007

EVANGELISTA, L; DE BRITO, J; Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites 32; pp. 9-14. 2010

FUERTES, A. Trabajo de Grado de Especialización Hacia un Desarrollo Sostenible en la Producción de Concreto a partir de Desechos de Construcción de Mampostería de Arcilla. Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito. Bogotá. 2012

GÓMEZ, J. Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Recicladados de Concreto. Revista Construcción y Tecnología del IMCYC. Vol.15. No.167, pp.10-12

GÓMEZ, SOBERÓN, J.M.V; AGULLÓ FITÉ, LI.; VÁZQUEZ ROMANICH, E. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto. "Tecnología y construcción", 2002, XIII-157,10-22* 0187-7895

GÓMEZ, J. Durabilidad del Concreto. Memorias de la Conferencia Durabilidad del Concreto. Sika, Ecuador. 2010

GÓMEZ, J. Sortividad de Concretos empleando Concreto Reciclado como Agregado Grueso – La Experiencia Colombiana. XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIII Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Antigua Guatemala. 2011

GONZÁLEZ, M. Ataque Químico al Concreto. Exposición en el Ciclo Organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto. Perú. 1991

HARO, V. Estudio de la Durabilidad con Áridos Reciclados. Ingeniería de la Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña 2009

HANSEN, T.C.; SCHULZ, R.; CH. F.; MOLIN, C; LAURITZEN, E.K. Recycling of Demolition Concrete and Masonry. Report of Technical committee 37-DCR Demolition and Reuse of Concrete. RILEM; Ed. T.C. Hansen. 1992

HERNÁNDEZ, C., FORNASIER, G. Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregado Grueso Reciclado. Revista Hormigonar No.7, pp.6-14, Asociación Argentina del Hormigón Elaborado, Buenos Aires, 2005

JOVANÉ, M. Comparación de Permeabilidad en el Concreto mediante Ensayo de Sortividad y Permeabilidad Superficial Inicial. Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2009

KASAI, Y., HISAKA, M., YANGI, K. Durability of Concrete using Recycled Coarse Aggregate; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasay; pp 643-651. 1988

LEÓN, A. Propiedades del concreto reciclado como agregado. Bogotá, D.C., 2001, 170p. Trabajo de grado (Magíster en Construcción). Universidad Nacional de Colombia. Universidad Politécnica de Valencia. Facultad de Artes. Departamento de Construcción.

LÓPEZ, F. Influencia de la Variación de los Parámetros de Dosificación y Fabricación de Hormigón Reciclado Estructural sobre sus Propiedades Físicas y Mecánica. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Gijón. España. 2008

MALHOTRA, V.M. Use of Recycled Concrete as a new Aggregate. Report 76/18, Canadian Center of Mineral and Energy Technology. Ottawa, Canadá. 1796

MARTÍNEZ, I. y MENDOZA, J. Comportamiento Mecánico de Concreto Fabricado con Agregados Reciclados. Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volumen II. No.3. pp.151-164. México. 2006

MATALLANA, R. Fundamentos de concreto aplicados a la construcción. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. 150p. Medellín, Colombia. 2006

MORENO E., ET. AL. Efecto de la Relación Agua/Cemento en la Velocidad de Carbonatación del Concreto utilizando una Cámara de Aceleración. Revista Ingeniería 8-2, pp.117-130. 2004

NILSON, A. Diseño de Estructuras de Concreto. Duodécima Edición. Bogotá, Colombia. 2009

PINZÓN, H. Trabajo de Grado de Especialización Valoración de Algunas Propiedades del Concreto Adicionado con Vidrio Pulverizado. Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio Garavito. Bogotá. 2009

RAKSHVIR, MAJOR; BARAI, SUDHIRKUMAR V., Studies on recycled aggregates-based concrete Waste management & research; 24(3): p.225-33. India. 2006.

REYES, D. Manejo y reciclaje de escombros de construcción. Trabajo de grado (Arquitecto). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes. Departamento de Construcción. 153p. Santafé de Bogotá. Colombia. 1999

RODRÍGUEZ, S. El Uso de Agregados Reciclados en España. Memorias Seminario Mitos y Realidades. Asogravas y Asocreto. Bogotá. 2011

ROLÓN, J., NIEVES, D., ET. AL. Caracterización del Hormigón Elaborado con Áridos Reciclados Producto de la Demolición de Estructuras de Hormigón. Revista Materiales de Construcción. Vol. 57. No.288. p.p.5-15. 2007

SAKAI, K. Tiempo de Reciclar. Revista Obras. Disponible en: www.cnnexpansion.com/obras/2010/02/05/tiempo-de-reciclar. 2010.

SALAS, R. Reciclaje del concreto. Seminario Sobre El Concreto Como Material. Caracas, Universidad Central de Venezuela. 17 p. Caracas, Venezuela. 1984

SÁNCHEZ DE SAN JUAN M., ALAEJOS, P., Aspectos Químicos del Árido Reciclado Relacionados con la Durabilidad del Concreto. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. C/ALFONSO XII, 3 y 5. 2004

SÁNCHEZ DE JUAN, M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Ingeniería Civil: Construcción / E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). 2004. [citado 30 de Junio 2008] Disponible en Internet: <http://oa.upm.es/381>

SÁNCHEZ, D. Tecnología del concreto y del mortero. Bhandar Editores Ltda. 349p. Santafé de Bogotá. Colombia. 2001

SÁNCHEZ, D. Durabilidad y Patología del Concreto. Colección Especializada del Concreto. Asocreto. Bogotá, Colombia. 2006

SÁNCHEZ, D. Durabilidad y Patología del Concreto. Asocreto. Segunda Edición. Bogotá, Colombia. 2011

SERRANO, G. Evaluación Económica de una Microempresa de Reciclaje de Escombros. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental. Barranquilla, Colombia. 2009

SOLIS, R.G., MORENO, E.I. y CASTILLO, R.W. Predicción de la Resistencia con Base en la Velocidad de Pulso Ultrasónico y un Índice de Calidad de los Agregados. Universidad Autónoma de Yucatán. Revista Técnica de Ingeniería. pp. 41-52. México

SOTO, I. et. Al. Uso de RCD's como Áridos Reciclados y su Empleo en Hormigones Estructurales. Pesquisa e Tecnologia MINERVA. Escuela de Ingeniería de San Carlos. Universidad de Sao Paulo. Brasil. 2006

TERENISHI, K.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; KIKUCHI, M; Application of Recycled Aggregate Concrete for Structure Concrete. Part. 3 – Production of Recycled Aggregate by Real Scale Plant and Quality Recycled Concrete Aggregate. Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Lymbachiya; pp.143 – 156. 1998

THOMAS, C., SETIÉN, J., POLANCO, J. Daño por Fatiga en Hormigones Reciclados. Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 1. 2011

TONDA, M., BEGLIARDO, H., PANIGATTI, M. Reciclado de Hormigón sin Preselección en Origen. Hormigonar – Revista de la Asociación Argentina del Hormigón Elaborado. Año 6, Edición 18, 2009.

TORRES, N. QUIROGA, P. Comparación del Comportamiento de Elementos Estructurales Elaborados con Concreto Convencional y Concreto con Agregados Reciclados en Colombia. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. No.87. pp.7-14. Bogotá. 2012

TORRES, J. H. Reciclaje de desechos Sólidos de la Construcción. Análisis comparativo para la elaboración de concreto con áridos reciclados. 158p. Trabajo de grado (Magíster en Construcción). Universidad Politécnica de Valencia. Facultad de Artes. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá, 2000

TORRES, N. Valoración del Paso de Cloruros en Concretos con Diferentes Características. Revista Técnica American Concrete Institute – Seccional Colombiana. No.8. Bogotá, Colombia. 2006

TORRES, N., QUIROGA, P. Concreto con Agregados Provenientes de Escombros de Construcción y Demolición en Colombia. Revista Técnica American Concrete Institute- Seccional Colombiana. No.18. 2011

VELANDIA, D. Seminario Agregados Reciclados: Mitos y Realidades. ASOCRETO y ASOGRAVAS. Concretos Argos. Bogotá. Julio de 2011.

Tecnología del concreto. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Asociación Colombiana de Productores de Cemento – ASOCRETO. Tomo I. Tercera Edición. Bogotá, Colombia. 2010

Colección Básica del Concreto 1. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de Cemento – ASOCRETO. Segunda Edición. Bogotá, Colombia. 2010

Colección Básica del Concreto: Tecnología y Propiedades / Instituto del Concreto. No.1. 213 p. ISSN 958-96709-0-3. Bogotá, Colombia. 2000

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Guía Técnica para el manejo de escombros de la construcción. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. 35 p.

CAMACOL. Evolución de la actividad edificadora en Bogotá y los municipios aledaños. I Semestre de 2008. Bogotá, 2008.

Memorias Seminario Experiencia Internacional para Reciclaje de Concreto. ASOGRAVAS. Bogotá, Colombia. 2011

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Secretaría Distrital de Ambiente. Resolución No.01115 del 26 de septiembre de 2012 “por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital...”

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Acuerdo Distrital 489 de 2012. Plan Nacional de Desarrollo de la ciudad de Bogotá. 2012 – 2016.

Norma Técnica Colombiana 77. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos

Norma Técnica Colombiana 92. (ASTM C 29). Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas de Agregados.

Norma Técnica Colombiana 93. (ASTM C 535) Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la Resistencia al Desgaste de los Agregados Gruesos Mayores de 19 mm, Utilizando la Máquina de Los Ángeles.

Norma Técnica Colombiana 174 (ASTM C 33). Concretos. Especificaciones de los Agregados para Concreto

Norma Técnica Colombiana 237. (ASTM C 128). Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Fino

Norma Técnica Colombiana 673. (ASTM C39). Concretos. Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Normales de Concreto

Norma Técnica Colombiana NTC 2871. (ASTM C78). Método de Ensayo para Determinar la Resistencia del Concreto a la Flexión (Utilizando una Viga Simple con Carga en los Tercios Medios)

Norma Técnica Colombiana 4025. (ASTM-C469). Concretos. Método de Ensayo para Determinar el Módulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión

Norma Técnica Colombiana NTC 4325. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para la Determinación de la Velocidad del Pulso Ultrasónico a Través del Concreto

ASTM C-1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

ASTM C 1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic – Cement Concretes

ASTM D 6928. Standard Test Method for Resistance of Course Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro Deval Apparatus

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98