

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
	Dependencia	Aprobado	Pág.	
	DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO	i(101)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	ISMAEL LEONARDO SANCHEZ VERGEL		
FACULTAD	FACULTAD DE INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL		
DIRECTOR	KATERINE CARREÑO GARCIA		
TÍTULO DE LA TESIS	PROPIEDADES MECANICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETOS HACIENDO USO DE AGREGADOS RECICLADOS EN CONSTRUCCION DE VIVIENDAS EN EL MUNICIPIO DE OCAÑA NORTE DE SANTANDER.		
RESUMEN			
(70 palabras aproximadamente)			
<p>EL RECICLAJE DE CONCRETO ESTÁ TOMANDO UN AUGE EXPANSIVO EN LAS CONSTRUCCIONES EN COLOMBIA. ESTA TESIS DE GRADO BUSCA APORTAR ELEMENTOS CLAROS E IMPORTANTES PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DEL USO DEL CONCRETO RECICLADO COMO UNA ALTERNATIVA ECONÓMICA EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN Y MOTIVAR SU FOMENTO. ESTUDIANDO LOS ENSAYOS COMPARATIVOS PARA DETERMINAR, LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y LA DURABILIDAD DEL CONCRETO ELABORADO CON AGREGADO RECICLADO DETERMINANDO LA IMPORTANCIA QUE TIENE ESTE.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 101	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:1



**PROPIEDADES MECANICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETOS HACIENDO USO
DE AGREGADOS RECICLADOS EN CONSTRUCCION DE VIVIENDAS EN EL
MUNICIPIO DE OCAÑA NORTE DE SANTANDER.**

ISMAEL LEONARDO SANCHEZ VERGEL

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

KATERINE CARREÑO GARCIA
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS
INGENIERIA CIVIL

Ocaña, Colombia

Agosto de 2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante en mi formación profesional. A mis padres y familiares por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional y por siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento, por su interés y constancia acá está la recompensa, el cumplir esta meta en mi vida.

ISMAEL LEONARDO SANCHEZ VERGEL

Índice

Resumen	10
Introducción	11
Capítulo 1. Propiedades mecánicas y durabilidad de concretos haciendo uso de agregados reciclados en construcción de viviendas en el municipio de Ocaña norte de Santander.....	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.1.1 Formulación del problema.....	12
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 General.....	12
1.2.2 Específicos.....	13
1.3 Justificación.....	13
1.4 Delimitaciones.....	14
1.4.1 Conceptual.....	14
1.4.2 Operativa.....	14
1.4.3 Temporal.....	14
1.4.4 Geográfica.....	14
Capítulo 2. Marco referencial	15
2.1 Marco histórico	15
2.1.1 Historia del concreto reciclado a nivel internacional.....	15
2.1.2 Historia del concreto reciclado a nivel nacional.....	16
2.1.3 Historia del concreto reciclado a nivel local	18
2.2 Marco conceptual.....	18
2.3 Marco teórico	33
2.4 Marco legal.....	39
Capítulo 3. Diseño metodológico.....	41
3.1 Tipo de investigación	41
3.2 Población.....	42
3.3 Muestra.....	42

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	42
3.5 Análisis de la información	43
Capítulo 4. Presentación de resultados.....	44
4.1 Comparar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción, coeficiente de forma, y desgaste.	44
4.2 Comparar el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de porcentaje de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional, para una dosificación determinada.....	52
4.3 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.	61
Conclusiones.....	76
Recomendaciones.....	79
Referencia.....	80
Apéndice	82

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados propiedades físicas agregado fino natural.....	45
Tabla 2. Resultados propiedades físicas agregado grueso natural.....	46
Tabla 3. Resultados propiedades físicas agregado grueso reciclado	47
Tabla 4. Comparación propiedades físicas agregados natural y reciclado	48
Tabla 5. Resultados coeficiente de forma agregado grueso natural	49
Tabla 6. Resultados ensayo de desgaste.....	50
Tabla 7. Resumen de las Propiedades físicas y mecánicas de los agregados gruesos	51
Tabla 8. Resistencia promedio a la compresión obtenida (MPa).....	53
Tabla 9. Promedio módulo de elasticidad (MPa).....	57
Tabla 10. Promedio de resistencia a la flexión a los 28 días de edad	60
Tabla 11. Promedio penetración de cloruros (Coulombs)	62
Tabla 12. Profundidad de carbonatación inicial y final (mm)	66
Tabla 13. Constantes de carbonatación acelerada (Kc) y ambiente (Ka)	66
Tabla 14. Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m² x s), (58 días).....	69
Tabla 15. Promedio datos obtenidos de sortividad (mm/s^{1/2})	71
Tabla 16. Información especímenes antes de introducir en solución de sulfatos	74
Tabla 17. Porcentaje de expansión cilindros de concreto	74

Lista de figuras

Figura 1. Determinación densidad del cemento. Frasco de Le Chatelier	44
Figura 2. Prensa hidráulica 200 t.....	52
Figura 3. Ensayo resistencia a la compresión. Cilindro fallado.....	53
Figura 4. Comparativo promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).	54
Figura 5. Promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).	55
Figura 6. Ensayo módulo de elasticidad.....	56
Figura 7. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa).....	57
Figura 8. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa).....	58
Figura 9. Montaje prueba de flexión vigueta (500 x 150 x 150 mm)	59
Figura 10. Montaje ensayo permeabilidad a cloruros,.....	62
Figura 11. Penetración de Cloruros.....	63
Figura 12. Cámara de carbonatación.	65
Figura 13. Comparaciones constantes de carbonatación.	67
Figura 14. Montaje ensayo tasa de absorción superficial inicial	68
Figura 15. Absorción inicial vs. Tiempo según % reemplazo	69
Figura 16. Montaje acorde con ASTM C 1585.	71
Figura 17. Índice inicial de absorción.....	72
Figura 18. Especímenes en solución de sulfato de sodio.....	73
Figura 19. Promedio expansión del concreto producido por sulfatos (%)......	75

Resumen

El concreto está en todas partes moldeando nuestro entorno, es el segundo material más consumido después del agua. El reciclaje de concreto está tomando un auge expansivo en las construcciones en Colombia. Esta tesis de grado busca aportar elementos claros e importantes para determinar la viabilidad del uso del concreto reciclado como una alternativa económica en obras de construcción y motivar su fomento. Aportando en si los aportes bibliográficos que se estudian en este documento a nivel mundial y nacional acerca del concreto reciclado y los ensayos comparativos para determinar, las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto elaborado con agregado reciclado determinando la importancia que tiene este para el crecimiento de las ciudades y su población.

Introducción

La ingeniería civil como profesión le ha dado al mundo grandes aportes para el desarrollo en la parte de la construcción de grandes obras para el crecimiento de la civilización.

Esta tesis de grado quiere dar a conocer la importancia que tiene el concreto reciclado para la elaboración de construcciones con el uso de la misma, conociendo por medio de ensayos sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto reutilizado, disponiendo de sus materias primas asequibles y los costos bajos que demande el tipo de construcción a realizar.

Las grandes potencias mundiales están avanzadas en este tipo de construcciones reutilizando material desplomado para la transformación de los residuos de construcción.

En Colombia existe normatividad al respecto, en materia de reciclaje y reutilización de los desechos que deja la construcción.

Es por esta razón que el objetivo de esta tesis de grado es recolectar los resultados teóricos relacionados con el tema y los resultados experimentales, utilizando agregados reciclados para analizar algunas propiedades físicas y mecánicas del concreto reciclado, su durabilidad y su comportamiento para obras de construcción.

Se espera con este trabajo de investigación alcanzar todos los objetivos planteados para brindar un nuevo aporte a la ingeniería civil y contribuir al bienestar de la sociedad colombiana.

Capítulo 1. Propiedades mecánicas y durabilidad de concretos haciendo uso de agregados reciclados en construcción de viviendas en el municipio de Ocaña norte de Santander.

1.1 Planteamiento del problema.

El reciclaje del concreto es un asunto que se encuentra hasta ahora en una etapa preliminar de investigación en Colombia. 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, 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. (BEDOYA Carlos Mauricio, 1998)

1.1.1 Formulación del problema.

¿Es viable el uso de agregado reciclado como alternativa en obras de construcción?

1.2 Objetivos.

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

1.2.2 Específicos.

Comparar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción, coeficiente de forma, y desgaste.

Comparar el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de porcentaje de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional, para una dosificación determinada.

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.

1.3 Justificación.

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.

1.4 Delimitaciones.

1.4.1 Conceptual.

Para el desarrollo del proyecto es necesario tener los conceptos claros tales como: Propiedades mecánicas, durabilidad, concreto, reciclaje, agregado fino, agregado grueso, ensayos de laboratorio, granulometría, densidad, absorción, propiedades físicas, permeabilidad, coeficiente de forma, y desgaste, carbonatación.

1.4.2 Operativa.

Durante la realización de la investigación se programarán las actividades a realizar, y hacer las correcciones requeridas sobre el tema. Se prevé que en la recolección de la información por parte de las personas encuestadas se puedan presentar inconvenientes o negativa al responder las preguntas para la obtención de resultados de la investigación para afrontar las diferentes dificultades que se presenten, y los resultados arrojados en los distintos ensayos realizados en el laboratorio de resistencia de materiales y sísmica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

1.4.3 Temporal.

La realización de la investigación tendrá una duración de ocho (8) semanas.

1.4.4 Geográfica.

El estudio se llevará a cabo en el municipio de Ocaña Norte de Santander.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1 Marco histórico

2.1.1 Historia del concreto reciclado a nivel internacional

El concreto está en todas partes. Es el segundo material más consumido después del agua y moldea nuestro entorno. Hogares, escuelas, hospitales, oficinas, vías y aceras, todos se hacen a partir del concreto. El concreto es extremadamente perdurable y puede conservarse por cientos de años en muchas aplicaciones. No obstante, las necesidades humanas cambian y se generan desechos más de 900 millones de toneladas por año tan solo en Europa, los estados Unidos y Japón, y otro tanto desconocido en el resto del mundo. El concreto puede ser recuperado el concreto puede ser triturado y reutilizado como agregado en nuevos proyectos. **(CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE, sf)**

Como parte de la Iniciativa por la Sostenibilidad del Cemento (CSI, por sus siglas en inglés), la industria del cemento ha venido considerando el reciclaje de concreto como un componente de las mejores prácticas para el desarrollo sostenible. Este reporte proporciona información general sobre la situación al respecto desde una perspectiva global. En algunos países se logra una recuperación casi completa del concreto, en tanto que en otros países el potencial de recuperación de concreto es ignorado y termina como desecho innecesario en basureros municipales. Adicionalmente, las estadísticas sobre desecho de concreto no son fáciles de encontrar, en parte, por el relativamente bajo peligro que dicho desecho representa en comparación a otros tipos de desechos y por el poco interés del público al respecto.

Aunque el concreto es un desecho relativamente inofensivo, la industria del cemento apoya iniciativas para recuperar este recurso y minimizar la generación de desechos.

A nivel internacional está más difundido el uso del agregado de concreto reciclado y varios países europeos cuentan con una reconocida experiencia en este tema e incluso su aplicación es frecuente; por ejemplo, en los Países Bajos desde 1991 – hace 22 años– se exige la utilización de agregados procedentes de concreto reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de concreto con excepción de las estructuras de concreto pre-esforzado. En otros países como Alemania, Reino Unido, Bélgica, Dinamarca y Australia también existen experiencias prácticas tanto en elementos estructurales como no estructurales.

2.1.2 Historia del concreto reciclado a nivel nacional

En el ámbito nacional se han realizado investigaciones dentro de las cuales se cuentan:

“Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras civiles”

Ing. Néstor Raúl Bojacá Castañeda.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

“Propiedades del concreto reciclado como agregado”

Ing. Álvaro León Rodríguez.

Universidad Nacional de Colombia.

“Agregado reciclado para morteros”

Ángela Hincapié – Elisa Aguja.

Universidad EAFIT.

“Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para uso en edificaciones convencionales”

Juan Pablo Robles – Juliana Vanegas.

Pontificia Universidad Javeriana.

“Abrasión y sortividad en concretos con agregado grueso reciclado”

Laura Agudelo.

Universidad Nacional de Colombia.

“Análisis de la permeabilidad en concretos con agregado grueso reciclado y adición de ceniza volante”

Diana Milena Herrera Rodríguez.

Universidad Nacional de Colombia.

Pese a que se cuenta con muy buenas investigaciones del tema en cuestión, en Colombia actualmente se carece de una normatividad técnica que incentive su uso y aplicación.

A manera de evaluación del panorama actual en Colombia se tiene que:

“El empleo del concreto reciclado como agregado para confeccionar un nuevo concreto es una técnica que es prometedora y ha sido avalada por experiencias, tanto nacionales como de otros países.

Si bien algunas propiedades pueden resultar desmejoradas, en general lo son en grado menor. De otro lado, algunas propiedades resultan claramente mejoradas.

Existen dispersiones relativamente amplias en los resultados de los ensayos realizados. Igualmente, existen resultados en ocasiones contradictorios entre diversos investigadores.

Es muy importante determinar mediante pruebas de laboratorio las propiedades de cada concreto con agregado reciclado, pues su comportamiento es específico.

Desde un punto de vista especialmente ambiental, como también económico, el país está en mora de implementar el empleo a escala industrial del concreto reciclado como nuevo agregado”
(Gomez Cortes Jose Gabriel, 2006)

2.1.3 Historia del concreto reciclado a nivel local

De acuerdo a las investigaciones realizadas no se encontró información a nivel local respecto a construcciones realizadas con concreto reciclado en Ocaña Norte de Santander.

2.2 Marco conceptual

Concreto

El concreto es el segundo material más consumido en el mundo después del agua y constituye la base del entorno urbano. Se estima que en 2006 en el mundo se consumieron entre 21 y 31

billones de toneladas de concreto (conteniendo 2.54 billones de toneladas de cemento)³, a comparación de los menos de 2 – 2.5 billones de toneladas de concreto consumidas en 1950 (200 millones de toneladas de cemento). **(WBCSD , 2003)**

El concreto se compone de agregados gruesos (arena y grava) y finos (arena), cemento y agua. Los agregados naturales pueden ser reemplazados por agregados hechos a partir de concreto reciclado. Cenizas volantes, humo de sílice y escorias pueden ser utilizados como materiales cementosos reduciendo así el contenido de cemento. Estos materiales pueden ser añadidos en la última etapa de la producción del cemento o cuando se mezcla el concreto.

En los países desarrollados la mayoría del cemento se incorpora al concreto a nivel industrial y es vendido como mezcla lista de concreto. A una menor escala y más comúnmente en países en vía de desarrollo, el concreto es mezclado personalmente por el usuario directamente en el lugar de la construcción. **(WBCSD , 2003)**

Tipos de agregados

Como definición general, se entiende por agregado reciclado aquél “agregado resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción” (prEN 13242 “Aggregates unbound and hydraulizacly bound for use in civil engineering Works and road construction” en su versión de mayo de 2002, prEN 12620 “Aggregates for concrete” de abril de 2002). **(ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE, 2013)**

Los residuos de concreto de cemento con clinker Portland y agregados naturales, triturados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al material secundario “agregado de concreto reciclado”. Esta deriva de un solo tipo de material primario, el concreto, cuya

composición es heterogénea (cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones). El material obtenido de la forma descrita no puede considerarse, por tanto, un material uniforme.

Los otros tipos de agregados reciclados son:

“Agregado reciclado cerámico”: El cual se obtiene por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este agregado debe tener una densidad seca superior a 1600 kg/m³.

“Agregados reciclados mixtos”: Definido en la norma holandesa como un agregado que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de concreto con una densidad seca superior a 2100 kg/m³ y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el concreto, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m³.

Muchas normativas no permiten el uso de estos dos últimos tipos en concreto estructural ya que su empleo aumenta el contenido de aire y obliga también a una relación agua/cemento mayor. Adicionalmente, la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto pueden verse afectados negativamente. **(ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE, 2013)**

El único tipo de agregado reciclado que puede ser admisible para concreto estructural es el agregado de concreto reciclado y deben imponérsele valores límites para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad.

El uso de las fracciones finas del agregado de concreto reciclado implica, entre otros inconvenientes, un aumento muy notable de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que precisan en su dosificación. **(ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE, 2013)**

En general puede decirse que los agregados de concreto reciclado de tamaño mayor o igual a 4mm son potencialmente aptos para la fabricación de concreto.

Así mismo, si la sustitución de agregado grueso convencional es menor o igual al 20%, las propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes.

GRANULOMETRÍA

La granulometría de los agregados de concreto reciclado varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las trituradoras. El porcentaje de agregado grueso que se obtiene puede variar entre 70% y 90% del agregado total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del agregado grueso de concreto reciclado producido y de la composición del concreto original. **(ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE, 2013)**

La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los límites granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de agregado grueso en concreto estructural (ASTM, prEN).

En general, las granulometrías de los agregados de concreto reciclado se sitúan dentro de los límites que fijan las diferentes recomendaciones tanto para agregado natural como para agregado de concreto reciclado. El módulo granulométrico del agregado de concreto reciclado, para un mismo tamaño máximo del agregado, presenta pequeñas variaciones dependiendo principalmente del sistema de trituración empleado y en menor medida de la calidad del concreto original.

En principio, el agregado de concreto reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden, la presencia de estas

partículas en la superficie del agregado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento de la cantidad de agua de amasado necesaria. Por otra parte, después de obtener la fracción gruesa en el agregado de concreto reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4mm) debido a la disgregación que sufre el agregado al manipularse. Los valores más frecuentes oscilan entre 0,5-2%. **(ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE, 2013)**

Así, las recomendaciones de la Rilem y las especificaciones de Hong Kong para la utilización de agregado de concreto reciclado, establecen un límite del 5% para el contenido de partículas de tamaño inferior a 4mm en el agregado de concreto reciclado.

FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del concreto original provoca que la textura de los agregados de concreto reciclado sea más rugosa y porosa que la de los agregados naturales como consecuencia del proceso de trituración. No obstante, el coeficiente de forma del agregado de concreto reciclado es similar al que puede presentar el agregado natural. En una investigación nacional se obtuvo un coeficiente de forma para el agregado grueso reciclado de 0,24 y de 0,31 para el agregado grueso natural. **(BOJACA C & Néstor R, 2013)**

En investigaciones nacionales se establecieron para agregado reciclado proveniente de cilindros de prueba desechados una forma piramidal y una textura rugosa. Los estudios que han empleado el método del índice de partículas planas y alargadas ASTM D 4791 para determinar la forma del agregado grueso han encontrado sin embargo diferencias entre el agregado natural y el agregado de concreto reciclado, siendo menor el valor del índice en el caso del agregado de concreto reciclado. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas

que presentan las partículas tienden a aumentar el espesor de las partículas con forma plana y alargada, disminuyendo así el porcentaje de estas; otros estudios han empleado la microscopía óptica para evaluar la forma del agregado, observando que las partículas del agregado de concreto reciclado presentan una forma más redondeada. Sin embargo, otros estudios que han valorado la forma del agregado a través del índice de angulosidad, concluyen que las partículas del agregado de concreto reciclado son más angulosas. Esta disparidad en resultados y conclusiones de diferentes estudios puede deberse a la influencia de la calidad del concreto de origen sobre la forma, ya que los agregados es concreto reciclado tienden a ser más redondeados cuanto mayor es la relación agua/cemento del concreto original y por lo tanto menor la resistencia del mortero. Generalmente son las fracciones de menor tamaño del agregado grueso las que presentan una forma más desfavorable tanto utilizando como referencia el coeficiente de forma como el índice de partículas planas y alargadas. **(RODRÍGUEZ Alvaro L, 2001.)**

Densidad y absorción

La densidad del agregado de concreto reciclado es inferior a la del agregado natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del agregado de concreto reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500 kg/m³, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos agregados de densidad normal (no livianos: con una densidad cuando están sueltos y secos de 1120 kg/m³ o menos de acuerdo a ASTM C330/NTC 4045). **(RODRÍGUEZ Alvaro L, 2001.)**

La absorción es una de las propiedades físicas del agregado de concreto reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al agregado natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como

en la absorción del agregado de concreto reciclado son: el tamaño de las partículas, la calidad del concreto original y las técnicas de procesado.

Propiedades y durabilidad

Contenido de cloruros

Los agregados de concreto reciclado pueden presentar un contenido apreciable de cloruros, en función de la procedencia del concreto usado como materia prima, especialmente en concretos procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo. Así mismo, los concretos en los que se haya utilizado aditivos acelerantes, pueden también contener una elevada cantidad de cloruros. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

En el caso del agregado de concreto reciclado parece conveniente cuantificar además de los cloruros solubles en agua (como en los agregados naturales), los cloruros totales que contiene el agregado, ante la posibilidad de que haya cloruros combinados que en ciertas circunstancias puedan ser reactivos y atacar las armaduras. Este es el caso del cloro aluminato cálcico hidratado, ya que la presencia de iones sulfatos procedentes por ejemplo de ambientes marinos, puede llegar a liberar estos iones cloruros.

En general, cuando los hormigones no han estado expuestos a estas condiciones, los valores tanto de los cloruros solubles en agua como de los cloruros totales suelen oscilar entre 0,001-0,005%.

Contenido de sulfatos

El agregado de concreto reciclado puede contener un elevado contenido de sulfatos, ya que, al contenido propio del agregado natural, se le añaden los sulfatos que contienen la pasta adherida y

la presencia de contaminantes como el yeso cuando el concreto procede de edificación. Los sulfatos combinados presentes en la pasta de cemento pueden producir problemas en el concreto nuevo, debido por ejemplo a la carbonatación que puede sufrir la ettringita que produce su descomposición en sulfatos.

Así mismo, será necesario evitar la presencia de impurezas como el yeso, que podrían producir expansiones en el concreto. Una de las posibles medidas para reducir el contenido de yeso es eliminar del agregado de concreto reciclado los tamaños más finos, ya que es en ellos donde se concentra una mayor cantidad de yeso.

Resistencia a la helada

La resistencia a la helada de los agregados naturales se evalúa habitualmente mediante la pérdida de peso experimentada al someterlos a cinco ciclos con soluciones de sulfato magnésico. Se pueden emplear también métodos en los que se somete el agregado directamente a diez ciclos de hielo-deshielo en agua. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

Algunos autores señalan que el ensayo de resistencia a la helada realizado con soluciones de sulfato no es adecuado para evaluar la durabilidad de los agregados de concreto reciclado, teniendo en cuenta que las soluciones tienen un efecto químico destructivo sobre la pasta de cemento, pudiendo dar resultados no representativos.

Al igual que en otras propiedades, la calidad del concreto de origen y el tipo de procesamiento aplicado influyen de forma importante en la calidad del agregado de concreto reciclado. Al realizar varias trituraciones consecutivas se pueden conseguir agregados con un mejor comportamiento frente a la helada, próximo incluso al del agregado natural.

Reacción álcali-agregado

Algunos tipos de agregados pueden reaccionar con los álcalis del cemento en ambiente húmedo cuando el contenido de alcalinos en el concreto es elevado, dando lugar a un compuesto gelatinoso que produce expansiones en el concreto.

La utilización de agregado de concreto reciclado puede favorecer estas reacciones, ya que incorpora un mayor contenido de alcalinos debido a la pasta que lleva adherida. Adicionalmente, la diversidad de la naturaleza de los agregados de concreto reciclado hace muy difícil su control, para garantizar que no desencadenarán estas reacciones expansivas. Por este motivo, algunas recomendaciones de utilización de agregado de concreto reciclado lo consideran potencialmente reactivo. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

Mortero adherido

El agregado grueso de concreto reciclado posee una cierta cantidad de mortero adherido, que lo diferencia de los agregados naturales. Este mortero es el causante de las diferencias que existen entre las propiedades de un agregado natural y un agregado de concreto reciclado antes mencionadas: menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a las heladas, reacción álcali agregado y ataque de sulfatos, entre otros.

Estas propiedades afectan, a su vez, negativamente a las del concreto: módulo de elasticidad, retracción, flujo plástico y problemas asociados a la durabilidad. Cuanto mayor es el contenido de mortero adherido que presenta el agregado de concreto reciclado, más lo acusará el concreto fabricado con él. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

Dosificación

Para la dosificación del concreto con agregado grueso reciclado, en principio se pueden emplear los métodos convencionales de dosificación, aunque se han desarrollado algunas experiencias específicas respecto a la utilización de agregados de concreto reciclado. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

Contenido de agua

Para determinar el contenido de agua de la dosificación de concreto con agregado grueso de concreto reciclado, hay que tener en cuenta que la absorción de agua es mucho mayor en los agregados de concreto reciclado que en los convencionales, debido entre otros factores, al mortero adherido a los agregados originales. Para asumir este incremento en la demanda de agua se puede pre saturar el agregado o incrementar el agua de mezclado; también es posible corregir este efecto mediante la utilización de aditivos.

Contenido de cemento

En principio, los tipos de cemento utilizados serán los mismos que se emplearían en un concreto convencional para las mismas prestaciones. Debido a la menor calidad del agregado de concreto reciclado, para mantener la misma resistencia y consistencia, el concreto con agregado grueso de concreto reciclado necesitará un mayor contenido de cemento en su dosificación.

Relación agua/cemento

Como punto de partida, para un porcentaje de agregado de concreto reciclado reducido se puede considerar inicialmente que la relación agua/cemento necesaria para alcanzar una categoría resistente será la misma para el concreto convencional y el concreto con agregado grueso de concreto reciclado; aunque en la práctica, para sustituciones por encima del 50%, se deberá ajustar la relación agua/cemento en el concreto preparado con agregados de concreto reciclado mediante los ensayos correspondientes.

En general, para una misma resistencia, y sustitución total, la relación agua/cemento necesario en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado es menor que la del concreto convencional. **(BOJACA Néstor R, 2008.)**

Dosificación del agregado de concreto reciclado

Las propiedades del concreto fabricado con agregados de concreto reciclado tienden a empeorar a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. En la práctica, los valores aconsejables de sustitución llegan hasta el 50%. Esto se recoge en diferentes normativas, estableciéndose limitaciones a su dosificación.

Según RILEM, se puede emplear una proporción de hasta un 20% de agregado de concreto reciclado sin ninguna limitación en su resistencia y su aplicación, siempre que el contenido de material cerámico sea inferior al 10%. La normativa Belga describe parámetros parecidos a estos, estableciendo limitaciones a la absorción.

La norma Alemana DIN 1045, permite un empleo de hasta un 5% en peso de agregado reciclado sin establecer restricciones adicionales al concreto; según el ambiente de aplicación esta norma establece ciertas limitaciones en relación con los porcentajes de sustitución.

(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)

Adiciones

Existen algunas experiencias en las que se han empleado adiciones como por ejemplo humo de sílice y cenizas volantes en concreto con agregado grueso de concreto reciclado, obteniendo efectos beneficiosos similares a los concretos convencionales.

Aditivos

La utilización de aditivos plastificantes en las dosificaciones de concretos con agregado grueso de concreto reciclado, al igual que en los convencionales, permite conseguir adecuadas manejabilidades, siendo especialmente ventajosa la utilización de aditivos súper-plastificantes para mejorar los aspectos relativos a la demanda de agua, especialmente en los casos que se utilice agregado no pre saturado. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

Dispersión

Es importante destacar que se pueden presentar diferencias entre unas partidas y otras de agregados de concreto reciclado, que repercutirán en la resistencia a compresión del concreto. De este modo es posible que los coeficientes de variación resultantes puedan ser elevados en el control de calidad.

Si se controla la uniformidad, y la calidad de las partidas de agregados, estos coeficientes de variación pueden verse sustancialmente reducidos. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

Mezclado

Se encuentran distintas experiencias en las que se han empleado diferentes métodos de mezclado del concreto preparado con agregado grueso de concreto reciclado, distinguiéndose unos de otros en la necesidad de pre-saturar el agregado, o bien de su premezclado en seco, encontrándose ventajas e inconvenientes para cada uno de ellos. Estas alternativas son adecuadas para altos porcentajes de sustitución. En el caso de porcentajes reducidos de agregado de concreto reciclado, el procedimiento de fabricación puede ser el mismo que en un concreto convencional.

En lo relativo a la resistencia a la compresión del concreto endurecido, no hay diferencias apreciables entre los agregados secos y los saturados con superficie seca, siempre que la relación agua/cemento efectivo de los dos concretos sea la misma. Sin embargo, en los concretos fabricados con agregados de concreto reciclado previamente saturados disminuyen los valores de consistencia y las variaciones en la manejabilidad. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

Propiedades del concreto fresco

Consistencia

La incorporación total de agregado grueso de concreto reciclado seco en el concreto produce en general un aumento de la consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento. Debido a la elevada absorción que presenta el agregado de concreto reciclado, durante el proceso de mezclado una cierta cantidad de agua será retenida por los agregados, generando un aumento de consistencia en ocasiones importante y una reducción de la relación agua/cemento efectivo. Así, el aumento de la demanda de agua se debe principalmente a la mayor absorción y al cambio de granulometría del agregado, fundamentalmente por generación de finos durante el mezclado, aunque también pueden influir otros factores como su forma angular y su textura rugosa.

(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)

Además, la pérdida de manejabilidad es más rápida, ya que después del mezclado el agregado continúa absorbiendo agua. Esto presenta un problema cuando se trata de un concreto fabricado en planta, para el que se produce un intervalo de tiempo entre la producción y la puesta en obra.

Contenido de aire

El contenido de aire no experimenta aumentos apreciables en el concreto con agregado grueso de concreto reciclado.

Densidad en estado fresco

La densidad del concreto con agregado reciclado en estado fresco es inferior a la de un concreto convencional debido a la menor densidad que presenta el agregado de concreto reciclado, por el mortero que permanece adherido al agregado natural. Los valores de densidad pueden oscilar entre 2130 y 2400 kg/m³. **(SÁNCHEZ DE JUAN, 2005.)**

Exudación

La exudación del concreto con agregado de concreto reciclado será similar a la del concreto convencional si se utiliza el agregado saturado y muy inferior si se utiliza seco, ya que la elevada absorción de los agregados de concreto reciclado facilita la retención de agua. **(SÁNCHEZ DE JUAN, 2005.)**

Propiedades del concreto con agregado grueso de concreto reciclado

Las propiedades del concreto con agregado grueso de concreto reciclado pueden verse afectadas negativamente respecto a las de un concreto convencional con la misma dosificación.

El módulo de elasticidad y las resistencias pueden reducirse, y la retracción y el flujo plástico pueden aumentar en comparación con concretos de similares resistencias que contienen únicamente agregados naturales. Estas variaciones, debidas fundamentalmente a la cantidad de mortero adherido al agregado, serán mayores a medida que se aumente el porcentaje de sustitución de agregado natural por agregado de concreto reciclado.

Durabilidad

La durabilidad del concreto convencional se explica en gran parte por la dificultad que los agentes agresivos tienen para penetrar la red de poros del concreto, por ello, la porosidad y la permeabilidad son propiedades fundamentales que condicionan la durabilidad. La utilización de agregados de concreto reciclado introduce un mayor volumen de poros en el concreto que afectará a todos los mecanismos de transporte facilitando la penetración de los agentes agresivos lo que puede traducirse en una disminución de la durabilidad. (SÁNCHEZ DE JUAN, 2005.)

Otra cuestión específica de los concretos con agregados de concreto reciclado es la presencia de una pasta de distinta naturaleza a la del nuevo concreto y que puede influir en la reacción álcali-agregado. Así, el concreto original puede no haber experimentado la reacción álcali-agregado a pesar de contener agregado reactivo, por falta de alcalinos y/o de agua, condiciones que sin embargo pueden darse en el nuevo concreto por el cemento empleado y por la permeabilidad del mismo. (SÁNCHEZ DE JUAN, 2005.)

2.3 Marco teórico

Fuentes de residuos y producción de agregados de concreto reciclado

La obtención del agregado de concreto reciclado procede de dos fuentes u orígenes principales asociados, respectivamente, a los residuos fruto del propio proceso de construcción y a la demolición de estructuras existentes; este origen induce distintas características en el agregado fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el agregado procedente del

concreto reciclado. (**ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.**)

La operación de demolición debe considerarse de forma que permita el máximo grado de reutilización de componentes y materiales; la demolición selectiva favorece el conocimiento del futuro agregado de concreto reciclado, permite una preselección según la calidad del concreto a demoler y, en definitiva, favorece la uniformidad de la calidad.

Como se acaba de mencionar, la manera de mejorar la calidad del residuo de demolición es la demolición selectiva pero su viabilidad está condicionada por factores tales como la accesibilidad, el tiempo disponible y costo global de la actuación. La demolición selectiva es más cara en comparación con los métodos tradicionales de demolición, por ello, la incidencia del costo de procesado puede ser muy importante respecto a la adopción de un sistema u otro. Queda claro, pues, que demolición y reciclado deben considerarse conjuntamente. Los procesos de producción de agregados de concreto reciclado se realizan en plantas de tratamiento (fijas o móviles) que, en líneas generales, son similares a las empleadas en agregados naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes.

Para la eliminación de impurezas, durante la demolición debe evitarse que los escombros de concreto se mezclen con tierras, y conseguir que se reduzca al máximo el contenido de otros materiales de construcción no deseables, lo cual redundará favorablemente en el sentido de reducir tratamientos posteriores.

Las impurezas y contaminantes pueden ser metales, madera, plásticos, yeso, que deben ser eliminados, lo cual puede lograrse utilizando distintas técnicas según sea la naturaleza de los mismos. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

Los contaminantes de mayor tamaño pueden eliminarse manualmente, mientras que mediante el tamizado se eliminan las impurezas de menor tamaño, como puede ser la tierra, pudiéndose realizar en varias etapas para que resulte más efectivo.

Los residuos de demolición contienen importantes cantidades de acero que puede separarse magnéticamente.

Además, puede haber aluminio, cobre, plomo, zinc y aleaciones. Estos no son magnéticos y la forma más moderna de separación es por corrientes de Foucault produciendo la separación por repulsión de los metales no magnéticos y no ferrosos.

La separación de los materiales de baja densidad puede tener lugar en seco o por vía húmeda. En seco se utiliza la separación manual previa a la mecánica, y posteriormente, para la separación de los materiales ligeros se utilizan potentes corrientes de aire. Por otra parte, la separación por vía húmeda se efectúa en un baño de agua. Su inconveniente es la generación de barro.

Las impurezas producen en todos los casos un descenso de resistencia en el concreto, más pronunciado cuando son elementos como cal o arcilla, y en menor grado cuando se trata de asfalto o pinturas. Además, dependiendo del tipo de impureza se pueden presentar otros problemas, como reacciones álcali-agregado (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (ladrillos).

La presencia de impurezas depende en gran medida del tipo de agregado reciclado. El agregado procedente de escombros de concreto presenta generalmente un reducido contenido de impurezas, mientras que la incorporación incluso de pequeños porcentajes de escombros cerámicos aumenta generalmente la presencia de diferentes materiales como madera, yeso o vidrio. Además, las fracciones más finas suelen incorporar un mayor contenido de impurezas.

El concreto que constituye la materia prima para la obtención del nuevo agregado de concreto reciclado debe ser examinado, si es posible, previamente a su procesado. En especial con respecto a la posibilidad de la presencia de agregados potencialmente reactivos frente a los alcalinos. Debe evitarse también el concreto de cemento aluminoso y determinarse los contenidos originales de sulfatos y cloruros. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

La calidad del agregado obtenido depende de la calidad del material procesado y puede contener como principales contaminantes madera, yeso, arcilla, aluminio y plásticos, sin olvidar el vidrio que, según el tipo, puede acarrear una futura reacción álcali-sílice. Así mismo, en el

caso de tener conocimiento de procesos patológicos en el concreto original, éste debe rechazarse como materia prima. En el caso de material procedente de la carretera, el principal problema puede ser el asfalto y algunos contaminantes orgánicos perjudiciales. Es preciso, por tanto, limitar los porcentajes máximos de contaminantes y analizar con la debida frecuencia los agregados obtenidos.

La presencia de yeso debe ser reducida a través de severos criterios de aceptación previa del residuo de demolición, rechazándose la partida que contenga cantidades importantes de tal naturaleza. Además, el material fino ya triturado puede eliminarse en el lavado. En cualquier caso, el control de sulfatos en el agregado de concreto reciclado resultante debe ser sistemático.

Existen actualmente nuevas tendencias para la eliminación de impurezas, como la separación magnética por densidad. El principio de separación magnética en seco de materiales de mortero y cerámicos se basa en la susceptibilidad magnética de estos. Entonces, toda vez que la separación se basa en los contenidos de óxido de hierro y el del mortero y el concreto son sensiblemente iguales, el sistema puede aplicarse también para separar ladrillo y concreto. **(ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). , 2006.)**

También es importante tener ciertas consideraciones ambientales, previamente a la demolición debe determinarse la presencia de asbestos. En caso de detectar su presencia, los elementos deben ser eliminados rigurosamente de acuerdo con métodos específicos que suelen llevarse a cabo por empresas especializadas.

Debe minimizarse el riesgo de mezclar asbestos con futuros agregados de concreto reciclado, así mismo, en residuos de concreto es conveniente revisar el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos, aunque su presencia es poco probable dada la práctica desaparición de los alquitranes en las construcciones.

Lo anterior buscando evitar la liberación de sustancias peligrosas que pueden contener compuestos identificados como carcinógenos, mutágenos y teratógenos.

Los agregados de concreto reciclado procedentes de residuos de construcción y demolición no suelen tener problemas de impacto ambiental por lixiviación de metales, ya que no suelen estar presentes en los materiales de origen. En cambio, las cantidades de sulfatos, que proceden casi siempre del yeso, pueden superar los límites establecidos en las aguas de lixiviación. Los sulfatos pueden ser reducidos significativamente por lavado. Los lixiviados orgánicos no son frecuentes, pero en todo caso suelen concentrarse más en las fracciones finas.

Uso eficiente del concreto reciclado

El uso de agregados reciclados ha venido haciendo carrera entre todos los productores y consumidores de concreto, ya sea en mezclas elaboradas en las obras o en elementos prefabricados, inclusive se habla ya de especificaciones y parámetros para regular y optimizar el uso de este tipo de agregado y sus productos.

Uno de los caminos para fomentar el uso intensivo de estos tipos de concretos, es definir las propiedades del mismo por desempeño, evaluando las características mecánicas del elemento final y la durabilidad de los mismos con las teorías tradicionales para ello. Por esto, los

elementos prefabricados se vuelven atractivos para la investigación y uso de materiales reciclados de toda índole.

Han existido desde hace años desarrollos de elementos prefabricados de serie (bloques, adoquines, cordones, etc.) a los cuales se les han adicionado para reemplazo de agregados materiales como vidrio, caucho, PET, papel, cerámica, y en fin cualquier material inerte que pueda darle estructura al concreto y que no perjudique notablemente las propiedades del producto terminado, lastimosamente muchos de estos elementos resultan ser más costoso o de difícil consecución a la hora de sostener una producción industrial. Igualmente, el uso final de producto limita en algunos casos el nivel de adición por cambios de apariencia o de textura en los mismos. **(Rincón Juan Carlos, 2013)**

Uno de los usos más adecuados para incluir materiales reciclados son los bloques para muros de contención, ya que la normativa asociada a ellos, su apariencia y su uso final los convierte en elementos ideales para desarrollar e incluir agregados reciclados dentro de su masa de concreto.

2.4 [Marco legal](#)

En cuanto a la parte normativa, en la ley 99 de 1993 se define el desarrollo sostenible como el desarrollo que conduce al crecimiento económico, la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

Se crea el Ministerio del Medio Ambiente como un organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables. El Ministerio debe definir las políticas y regulaciones a las que se deben sujetar la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación. **(Ministerio de Medio Ambiente, 1993)**

Así mismo, el Ministerio debe formular la política nacional ambiental y de recursos naturales renovables para que se garantice el derecho de todas las personas a gozar de un medio ambiente sano y se proteja el patrimonio natural y la soberanía de la Nación. De igual forma, el Ministerio debe coordinar el SINA para asegurar la adopción y ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos respectivos.

Por otro lado, se define Desarrollo Sostenible como el que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades. **(Ministerio de Medio Ambiente, 1993)**

Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

Todo estudio debe iniciar con la indagación y recolección de datos, mediante el empleo de un tipo de investigación, que facilite información necesaria para su correcto desarrollo y ejecución. Existen varios tipos de investigación, entre las que encontramos: experimental, descriptiva, documental, de campo, entre otras.

Para este caso, se empleó la investigación descriptiva, que **según Rivas (1995)** “trata de obtener información acerca del fenómeno o proceso, para describir sus implicaciones”. (p.54). Este tipo de investigación, no se ocupa de la verificación de la hipótesis, sino de la descripción de hechos a partir de un criterio o modelo teórico definido previamente, lo cual nos permitió realizar un estudio descriptivo de los procesos y actividades propios de las PROPIEDADES MECANICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETOS HACIENDO USO DE AGREGADOS RECICLADOS EN CONSTRUCCION DE VIVIENDAS EN EL MUNICIPIO DE OCAÑA NORTE DE SANTANDER.

En cuanto al diseño de investigación, **Arias (2006) lo define como...**”la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado” (p. 26). Así mismo considera que la investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios) sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes (p.31).

Por tanto, para el desarrollo de este estudio el diseño de la investigación fue de campo, porque la información fue recolectada a través de la fuente primaria, que para este caso sería el laboratorio de Sísmica y Resistencia de la Universidad Francisco de Paula Santander donde serán aplicados los diferentes tipos de ensayos de agregados reciclados.

3.2 Población

Afirma Arias (2006) que la población “...es el conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. (p.81)

Para la investigación realizada, no se necesita población pues son ensayos en concreto que se van a realizar.

3.3 Muestra

García (2002) define la muestra como “...la unidad seleccionada de la población para la aplicación de la técnica de investigación. Puede ser un elemento o un conjunto de elementos. En esta investigación la muestra fue igual a la población, teniendo en cuenta que es muy pequeña y que no amerita la aplicación de una fórmula estadística.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información

Méndez A.C. 17 (2003), sostiene que según nivel de conocimiento científico al que se espera llegar, se debe formular el tipo de técnicas e instrumentos de recolección de información que se va a utilizar para obtener información, cuyo propósito es señalar el tipo de información que se necesita, así como el nivel de análisis que deberá realizar, para lo cual debe tenerse en cuenta los objetivos que se plantearon.

Para la recolección de la información se utilizaron técnicas como:

La observación directa, **según Arias (2006)**, indica que la observación directa consiste “en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación pre-establecidos”. (p.69) en este caso se observarán los diferentes ensayos realizados para conocer las PROPIEDADES MECANICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETOS HACIENDO USO DE AGREGADOS RECICLADOS.

3.5 Análisis de la información

Para el análisis de la información, inicialmente se tomó, como fuente primaria la recolección de información mediante libros, internet y ensayos de laboratorio anteriores, los tipos de materiales utilizados para dichos ensayos y la verificación de los mismos que permitirán aplicar los respectivos indicadores que ayudaran a determinar las PROPIEDADES MECANICAS Y DURABILIDAD DE CONCRETOS HACIENDO USO DE AGREGADOS RECICLADOS EN CONSTRUCCION DE VIVIENDAS EN EL MUNICIPIO DE OCAÑA NORTE DE SANTANDER.

Capítulo 4. Presentación de resultados

4.1 Comparar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción, coeficiente de forma, y desgaste.

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

Cemento

Al cemento se le determinó el módulo de finura de acuerdo a la Norma ICONTEC 33 y su densidad de acuerdo a la Norma ICONTEC 221.



Figura 1. Determinación densidad del cemento. Frasco de Le Chatelier

Fuente: Autor del proyecto

La densidad del cemento portland tipo 1 obtenido fue de 3.09 g/cm³ (3090 kg/m³).

Granulometría

Se conoce como granulometría a la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una cantidad de agregado, su análisis se determina dividiendo una muestra en tamaños iguales, representando de una manera gráfica los resultados.

Agregado fino natural

Para determinar las propiedades físicas del agregado fino natural se realizó basado a la Norma Técnica Colombiana NTC 77. Realizando el siguiente procedimiento: se pasó arena por los siguientes 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; se halló el peso y el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices.

Tabla 1.

Resultados propiedades físicas agregado fino natural

Densidad aparente S	2,5 g/cm³
Densidad nominal	2,6 g/cm ³
Densidad aparente S.S.S	2,5 g/cm ³
Humedad de absorción	2,50%
Masa U. suelta	1580 Kg/cm ³
Masa U. compacta	1760 Kg/cm ³
Resultado de la prueba colorimétrica	5

Fuente: Autor del proyecto

Agregado grueso natural

Para determinar las propiedades físicas del agregado grueso natural se hizo acorde con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 77. Realizando el siguiente procedimiento: se pasó arena por los siguientes 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.

Tabla 2.

Resultados propiedades físicas agregado grueso natural

T. máximo	11/2"
T. máximo nominal	1"
Densidad aparente S	2,4 g/cm³
Densidad nominal	2,7 g/cm³
Densidad aparente S.S.S.	2,5 g/cm³
Humedad de absorción	4%
Masa u. suelta	1320 kg/cm³
Masa u. compacta	1480 kg/cm³

Fuente: Autor del proyecto

Agregado grueso reciclado

Para determinar las propiedades físicas del agregado grueso reciclado se hizo acorde con lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 77. Realizando el siguiente procedimiento: se pasó arena por los siguientes 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.

Tabla 3.

Resultados propiedades físicas agregado grueso reciclado

Tamaño máximo	11/2"
Tamaño máximo nominal	1"
Densidad aparente S.	2,2 g/cm ³
Densidad nominal	2,6 g/cm ³
Densidad aparente S.S.S.	2,3 g/cm ³
Humedad de absorción	8%
Masa u. suelta	1135 kg/cm ³
Masa u. compacta	1285 kg/cm ³

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 4.***Comparación propiedades físicas agregados natural y reciclado***

Propiedad física	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado	Variación %
Densidad aparente S	2,4 g/cm ³	2,2 g/cm ³	-8%
Densidad nominal	2,7 g/cm ³	2,6 g/cm ³	-4%
Densidad aparente S.S.S.	2,5 g/cm ³	2,3 g/cm ³	-8%
Humedad de absorción	4%	8%	100%
Masa unitaria suelta	1320 kg/cm ³	1135 kg/cm ³	-14%
Masa unitaria compacta	1480 kg/cm ³	1285 kg/cm ³	-13%
Tamaño máximo nominal	1"	1"	
Tamaño máximo	1 1/2"	1 1/2"	

Fuente: Autor del proyecto

De lo anterior se puede observar que la densidad aparente del agregado grueso reciclado fue un 8% menor que la del agregado natural. La densidad nominal del agregado reciclado fue 4% menor que la del agregado natural. La densidad aparente SSS, para el agregado reciclado fue un 8% 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, ya que el material reciclado tiene pasta de cemento que incide de forma directa en la humedad de absorción. Por esta razón 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.

Peso unitario

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

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 el trabajo de investigación.

Coefficiente de forma del agregado grueso natural y reciclado

Se determinó que La forma de los agregados es la redonda pues esta tiende a deslizarse mejor una sobre otras, siendo más fácil su acomodamiento compacta y densa. Esto quiere decir que en esta mezcla se requiere menor cantidad de agua para determinar una mejor manejabilidad, una mayor resistencia y menor cantidad de espacio. Su textura lisa a este tipo de forma redondeada, conlleva una menor adherencia que lleva a la reducción en la resistencia.

El coeficiente de forma entre más alargado sea su valor tiende a cero; entre mayor sea el valor se obtendrá un concreto más compacto.

Tabla 5.

Resultados coeficiente de forma agregado grueso natural

Agregado grueso natural	0,4
Agregado grueso reciclado	0,3

Fuente: Autor del proyecto

Los resultados del coeficiente de forma obtenidos para el agregado natural fueron de 0.4 y para el agregado reciclado fue de 0.3, constatando que el agregado grueso reciclado fue un 25% menor. De acuerdo a lo anterior, el agregado grueso natural tiene las partículas más redondas que las del agregado reciclado. Por otro lado, el coeficiente de forma de 0.3 obtenido para en el agregado reciclado, es mayor a 0.20 que es el valor mínimo que se sugiere en diferentes estudios.

Ensayo de resistencia al desgaste

En este ensayo se tomó la medida de degradación de los agregados su abrasión y el impacto dentro de un tambor de acero que rota. Esta prueba se realizó de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 93.

En este ensayo lo primero que se realizó se lavó y seco el agregado grueso reciclado en el horno hasta tener una masa constante, se siguieron los pasos de la norma separando por tamaños para encontrar la mejor gradación, se pasa el material por el tamiz No.12, obtenido la pérdida en peso del agregado reciclado con referencia a la masa inicial.

Tabla 6.

Resultados ensayo de desgaste

Natural	Reciclado triturado
31%	41%

Fuente: Autor del proyecto

El porcentaje al desgaste para el agregado natural fue del 31%, y para el agregado reciclado fue del 41%, teniendo este último un 10% más de desgaste. Ya que el reciclado triturado elimina el mortero que tiene adherido.

Tabla 7.***Resumen de las Propiedades físicas y mecánicas de los agregados gruesos***

Propiedad física	Natural	Reciclado
Tamaño máximo	1 1/2"	1 1/2"
Tamaño máximo nominal	1"	1"
Densidad aparente s	2,4 g/cm ³	2,2 g/cm ³
Densidad nominal	2,7 g/cm ³	2,6 g/cm ³
Densidad aparente S.S.S.	2,5 g/cm ³	2,3 g/cm ³
Humedad de absorción	4%	8%
Masa u suelta	1320 kg/cm ³	1135 kg/cm ³
Masa u compacta	1480 kg/cm ³	1285 kg/cm ³
Coefficiente de forma	0,4	0,3
Desgaste	31%	41%

Fuente: Autor del proyecto

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

4.2 Comparar el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de porcentaje de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional, para una dosificación determinada.

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; para el ensayo se utilizó una prensa hidráulica de 200 toneladas



Figura 2. Prensa hidráulica 200 t.

Fuente: Autor del proyecto



Figura 3. Ensayo resistencia a la compresión. Cilindro fallado.

Fuente: Autor del proyecto

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 8.

Resistencia promedio a la compresión obtenida (MPa)

Edad	M1	M2	M3	M2vsM1	M3vsM1
3 días	18	18	15	0%	-17%
28 días	27	28	25	4%	-8%
56 días	28	31	28.5	10%	2%
100 días	30	35	30.5	14%	2%
100 días concreto sumergido en sulfato	37	39	35	5%	-6%

Fuente: Autor del proyecto

Donde M1= remplazo agregado grueso al 0%

Donde M2= remplazo agregado grueso al 20%

Donde M3= remplazo agregado grueso al 40%

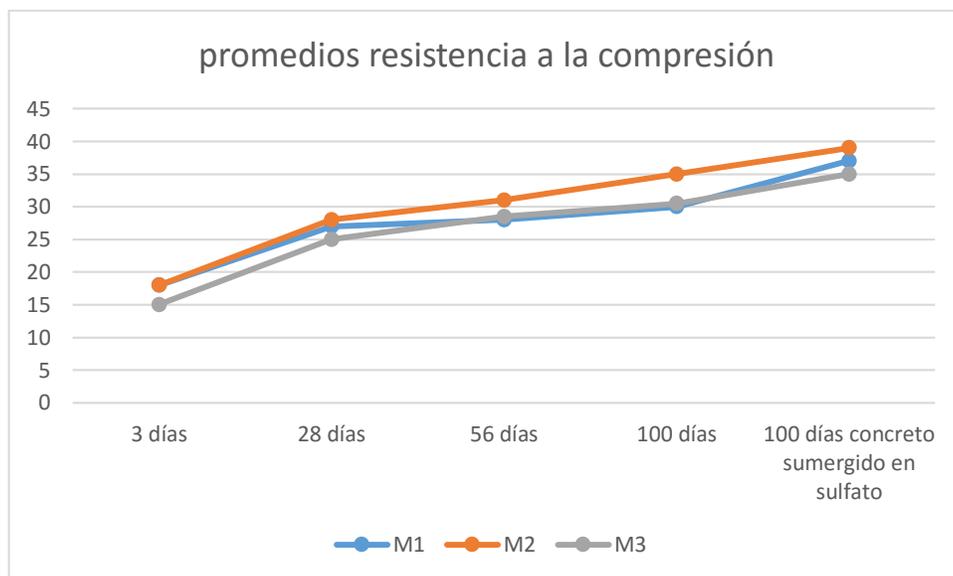


Figura 4. Comparativo promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).

Fuente: Autor del proyecto

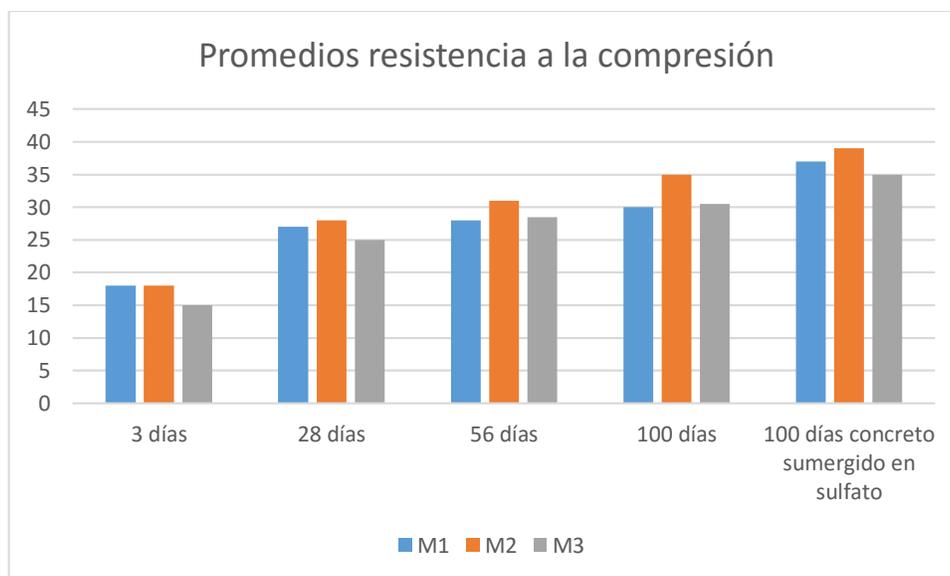


Figura 5. Promedio ensayo resistencia a la compresión (MPa).

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los datos obtenidos 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, 18 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 4%, 10%, 14% y 5%, mayor respectivamente. El concreto reciclado M3, a los 3 y 28 días tuvo una resistencia menor en un 17% y un 8% 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.

En 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, a los 28, 100 y 100 días concreto

sumergido al sulfato el concreto M2 tuvo una mayor resistencia a la compresión. Los concretos M1 y M3 a los 28, 56 y 100 días tienen una resistencia a la compresión similar.

En este ensayo se muestra que el concreto reciclado con 20% de reemplazo de agregado grueso tiene un buen comportamiento, según como lo indican diferentes normas se dice que este porcentaje es el máximo recomendado para obtener un concreto de calidad.

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



Figura 6. Ensayo módulo de elasticidad.

Fuente: Autor del proyecto

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

Tabla 9.

Promedio módulo de elasticidad (MPa)

Edad	M1	M2	M3
3 días	15860	15056	13447
28 días	18963	17756	17239
56 días	17585	19652	19307
100 días	19652	22065	20859
100 días concreto sumergido en sulfato	24306	22410	21031

Fuente: Autor del proyecto

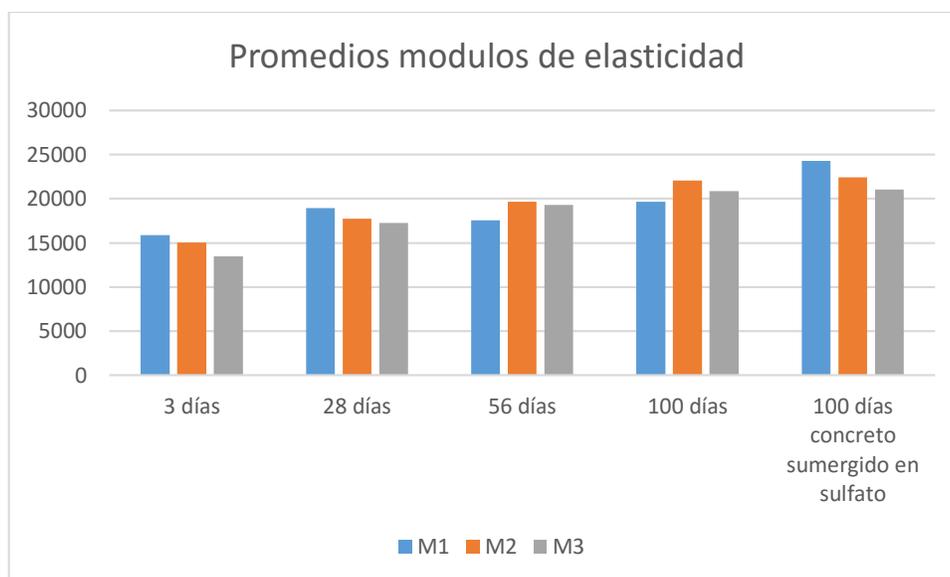


Figura 7. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)

Fuente: Autor del proyecto

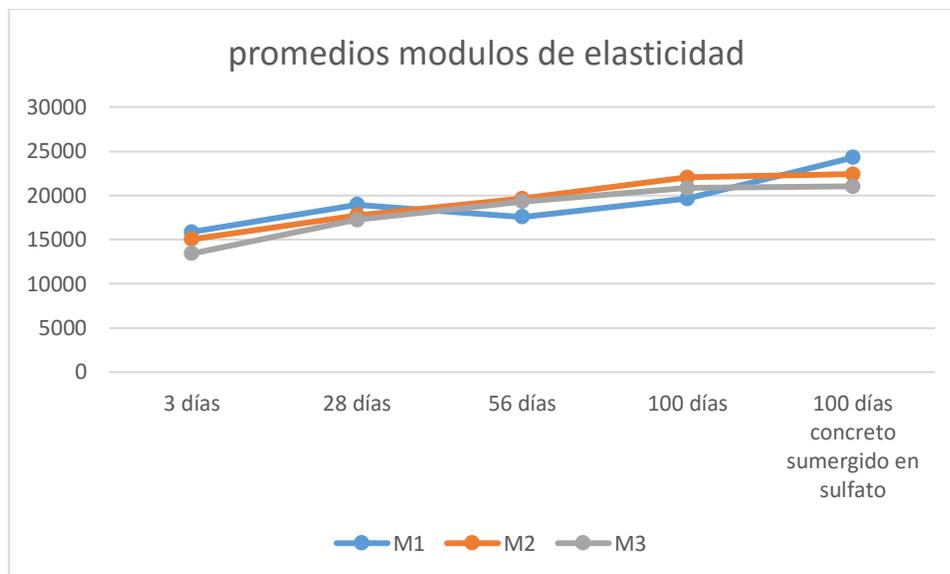


Figura 8. Promedio módulos de elasticidad para las diferentes mezclas (MPa)

Fuente: Autor del proyecto

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.

en cambio, para las edades de 56 y 100 días, donde el concreto M2 y M3 tienen un módulo de elasticidad mayor que el concreto M1, 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 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.

Se obtuvo a los 3 y 28 días que el concreto M1, es más rígido que el concreto reciclado M2 y M3, en cambio para edades de 56 y 100 días donde el concreto M1 tuvo menor módulo de elasticidad que M2 y M3.

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.



Figura 9. Montaje prueba de flexión vigueta (500 x 150 x 150 mm)

Fuente: Autor del proyecto

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 10.*Promedio de resistencia a la flexión a los 28 días de edad*

Concreto (agregado grueso)	Promedio de carga máxima aplicada (kg)	MR (MPa)
M1 0%	2850	3,9
M2 20%	2930	4,0
M3 40%	2470	3,4

Fuente: Autor del proyecto

Se observa con los anteriores resultados que el módulo de rotura mayor que se obtuvo es M2, en segundo lugar, M1 y por último el concreto reciclado M3, en porcentaje de 2% mayor que M1 y 18% mayor que M3. Los concretos señalados están 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%.

4.3 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.

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.

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.



Figura 10. Montaje ensayo permeabilidad a cloruros,

Fuente: <http://www.sepmi.com.mx/documentos/equipondt/Prueba%20rapida%20de%20permeabilidad%20de%20cloruros.pdf>

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

Tabla 11.

Promedio penetración de cloruros (Coulombs)

Edad	M1	M2	M3	M1 vs M2	M1 vs M3
28 días	2480	2367	2409	5%	3%
56 días	2994	2383	2532	26%	18%

Fuente: Autor del proyecto

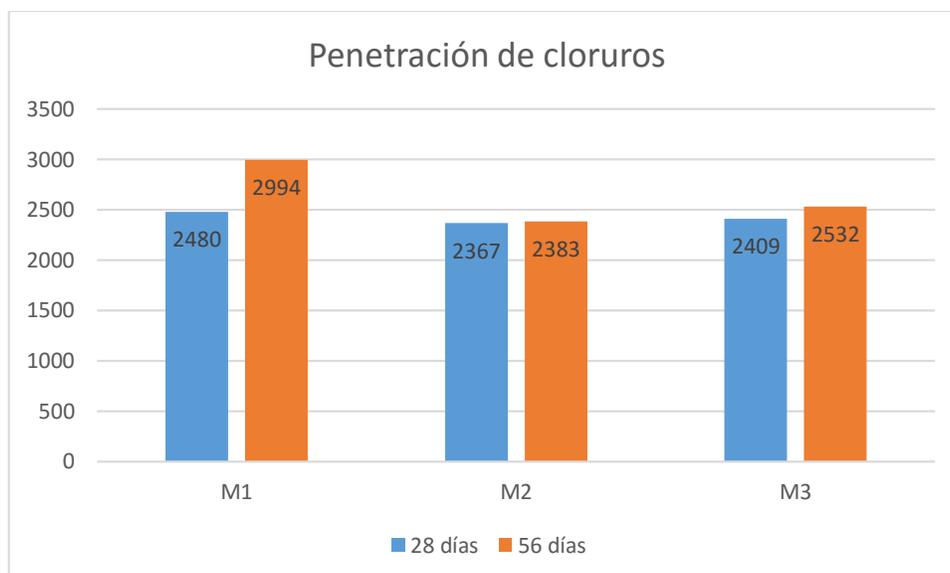


Figura 11. Penetración de Cloruros

Fuente: Autor del proyecto

a los 28 días de edad, los concretos sometidos a la prueba de cloruros, no muestran diferencias significativas. 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 en el concreto convencional M1 fue mayor que los concretos M3 y M2 conservando el mismo proceso que lo sucedido a los 28 días.

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 transmisión de carga entre 2000 y 4000 coulombs.

Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno en el cual el CO₂ 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 CO₂ 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).



Figura 12. Cámara de carbonatación.

Fuente: <http://www2.camino.upm.es/Departamentos/Construccion/Materiales/webmat/Ensayos%20mec%C3%A1nicosF.htm>

La profundidad de carbonatación hallada durante un período de 76 días se relaciona en la Tabla 12. 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. 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 12.

Tabla 12.

Profundidad de carbonatación inicial y final (mm)

	Profundidad de carbonatación inicial (Po) (28 días colocados en cámara)			Profundidad de carbonatación final (P) (104 días colocados en cámara)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
P (mm)	30,25	30,39	32,73	46,32	39,3	43,61
t (años)	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 13.

Constantes de carbonatación acelerada (Kc) y ambiente (Ka)

Coefficiente de Exposición (76 días)	M1	M2	M3	M2 vs M1	M3 vs M1
Frente	16	9	11	-45%	-32%
Carbonatación Cámara (mm)					
Kc	59	47	53	-20%	-9%
Ka	5,5	4,4	5,0	-20%	-9%
Calidad del Concreto	REGULAR	BUENA	BUENA		

Fuente: Autor del proyecto

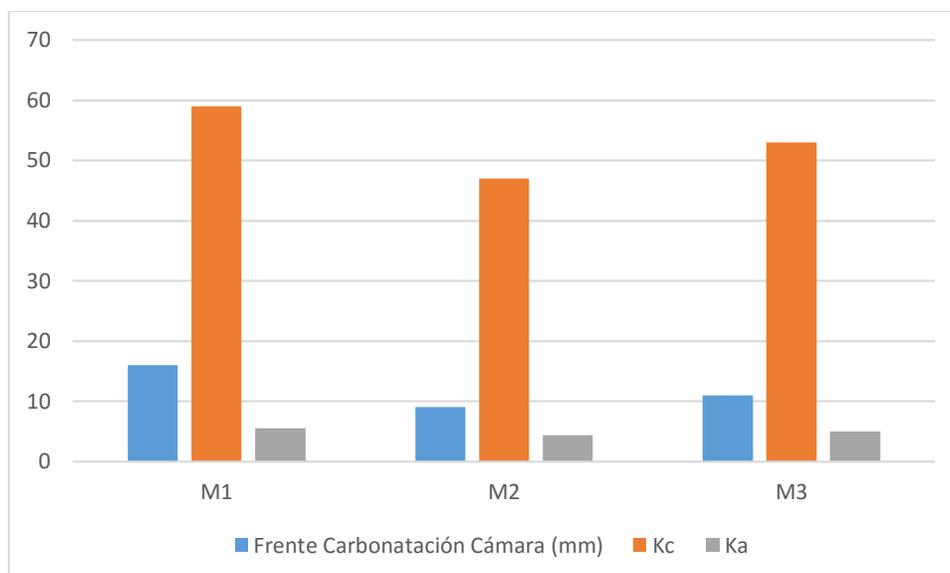


Figura 13. Comparaciones constantes de carbonatación.

Fuente: Autor del proyecto

Los datos obtenidos se pueden observar que los concretos reciclados M2 y M3, tuvieron menos avance de carbonatación que el concreto convencional M1. El frente de carbonatación del concreto M2, fue un 44% menor que el concreto convencional.

El coeficiente de carbonatación acelerada (K_c), obtenido en la cámara de carbonatación y el coeficiente de exposición al ambiente (K_a), se aprecia que estos coeficientes en el concreto reciclado M2 y M3, fueron menores comparados con el obtenido del concreto convencional M1, 20% y 9%. 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.

Tasa de absorción superficial inicial

Para el ensayo de tasa de absorción superficial inicial, 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.



Figura 14. Montaje ensayo tasa de absorción superficial inicial

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 14.

Promedio tasa inicial superficial de absorción (ml/m² x s), (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

Fuente: Autor del proyecto

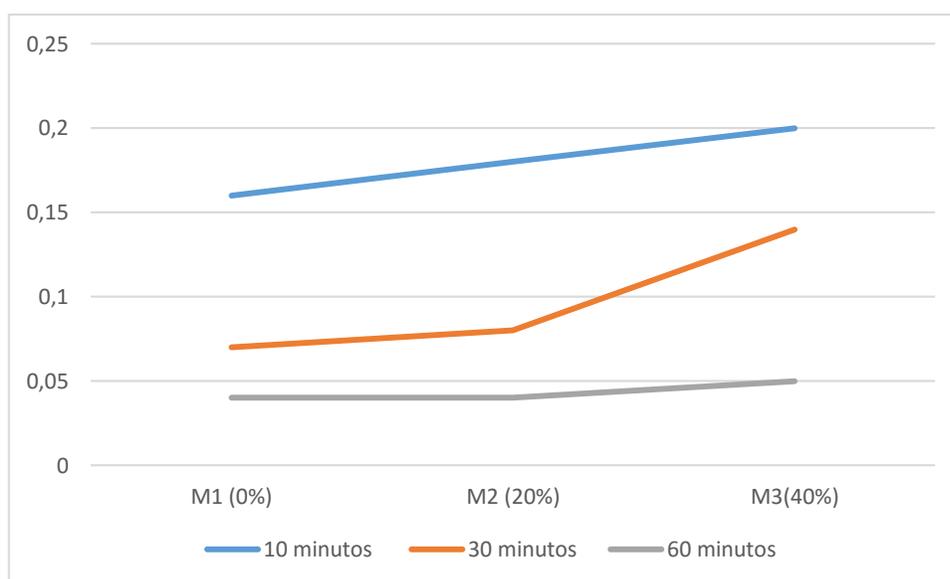


Figura 15. Absorción inicial vs. Tiempo según % reemplazo

Fuente: Autor del proyecto

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

Se puede observar que los valores de tasa inicial de absorción a los 10, 30 y 60 minutos M1 son los más bajos, seguidos de los concretos M2 y M3. En los primeros 10 minutos el concreto convencional M1 tiene 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.

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).



Figura 16. Montaje acorde con ASTM C 1585.

Fuente: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718915X2012000200010)

915X2012000200010

Los datos obtenidos del ensayo de sortividad tanto a los 28 como a los 56 días se relacionan a continuación en la tabla 15.

Tabla 15.

Promedio datos obtenidos de sortividad (mm/s^{1/2})

	M1	M1	M2	M2	M3	M3
	28 días	56 días	28 días	56 días	28 días	56 días
Índice inicial	0,0138	0,0045	0,0141	0,0037	0,0152	0,0054
de absorción						
Tasa	0,0033	0,0021	0,0026	0,0017	0,0043	0,0022
secundaria de						
absorción						

Fuente: Autor del proyecto

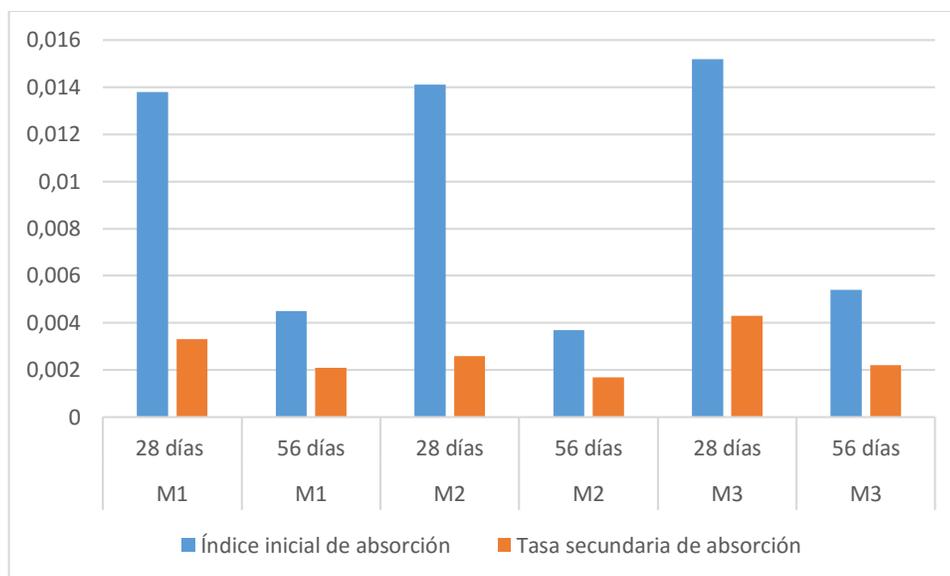


Figura 17. Índice inicial de absorción.

Fuente: Autor del proyecto

Los resultados obtenidos a los 28 días, el índice inicial de absorción M1 fue 2% menor que el concreto reciclado M2 y 9% menor que M3. El concreto M1 fue el que menos agua absorbió. A los 56 días, el concreto reciclado M2 fue 19% menor que el concreto convencional M1 y 33% menor que el concreto reciclado M3. el concreto M2 fue el que menos agua absorbió. De acuerdo con los datos obtenidos tanto en el concreto reciclado como en el convencional, son de calidad buena, según la clasificación de calidad de la sortividad de la International Concrete Repair Institute ICRI, como lo menciona GÓMEZ J. (2011).

La tasa secundaria a los 28 días, de absorción del concreto convencional M2, fue 23% menor que el concreto convencional M1 y 41% menor que el concreto reciclado M3, esto quiere decir que M2 fue el que menos agua absorbió. A los 56 días M2, fue 21% menor que el concreto convencional M1 y 25% menor que el concreto reciclado M3, lo que significa que M2 fue el que

menos agua absorbió. El concreto convencional M1, como reciclado M2 y M3, son clasificados como de calidad buena.

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.



Figura 18. Especímenes en solución de sulfato de sodio

Fuente: <http://javierlaboratorio.blogspot.com.co/2014/06/equivalente-de-arena.html>

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

Tabla 16.

Información especímenes antes de introducir en solución de sulfatos

MUESTRA	Peso (g)	DIAMETRO	ALTURA	CILINDRO	CILINDRO
		(mm)	(mm)	ÁREA (mm ²)	VOLUMEN (mm ³)
M1	3662	103	202	8092	1623718
M2	3664	103	203	8119	1641280
M3	3495	102	201	7986	1594411

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 17.

Porcentaje de expansión cilindros de concreto

MUESTRA	Peso (g)	DIAMETRO	ALTURA	CILINDRO	CILINDRO
		(mm)	(mm)	ÁREA (mm ²)	VOLUMEN (mm ³)
M1	0,69%	0,99%	0,43%	1,99%	2,42%
M2	0,53%	0,83%	0,34%	1,66%	1,99%
M3	0,55%	0,67%	0,34%	1,34%	1,67%

Fuente: Autor del proyecto

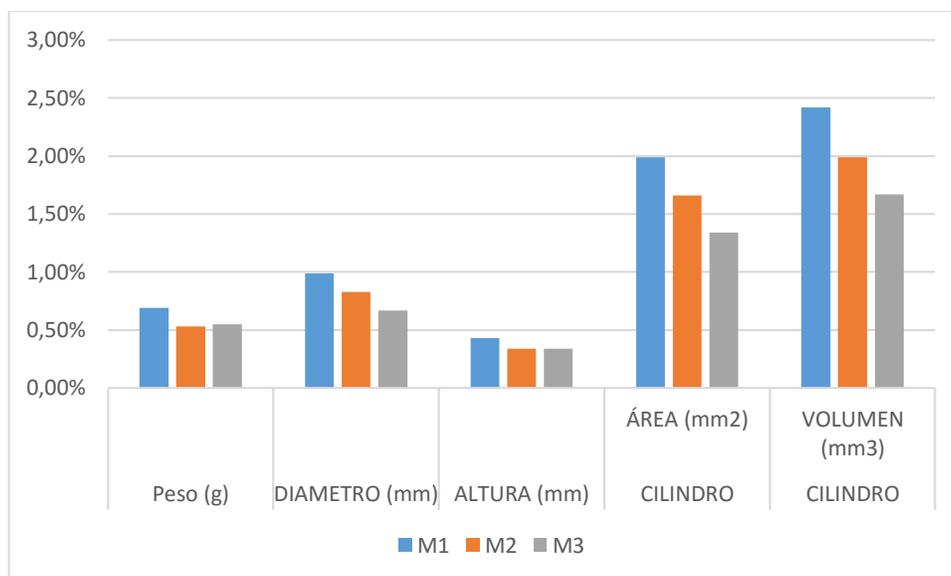


Figura 19. Promedio expansión del concreto producido por sulfatos (%).

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con los datos obtenidos durante el tiempo de exposición a los sulfatos, 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%.

Conclusiones

Se comprobó a fondo las propiedades físicas del agregado grueso reciclado con las propiedades físicas del agregado natural: granulometría, masa unitaria, absorción, coeficiente de forma, y desgaste.

Se comparó el comportamiento mecánico de la resistencia a compresión, módulo elástico, y resistencia a flexión del concreto con reemplazos de porcentaje de agregado grueso reciclado respecto a concreto convencional, para una dosificación determinada.

Se realizaron los ensayos correspondientes para conocer 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, sortividad, y sulfatos.

Se puede concluir según los ensayos realizados que al utilizar el concreto triturado de buena calidad sirve como reemplazo del agregado grueso natural.

El concreto reciclado que proviene de la trituración de concreto natural, según los ensayos realizados presenta mayor humedad, menor densidad, coeficiente de forma y menor resistencia de desgaste en la maquina universal, comprobando así la coincidencia con la bibliografía consultada.

Al remplazar el 40% del agregado grueso reciclado por el natural no se presenta deterioro de las propiedades mecánicas del concreto.

la resistencia de la compresión con 40% de remplazo fue similar a la de la muestra, mientras que la de concreto con 20% de remplazo fue un poco superior.

En cuanto al ensayo de elasticidad se concluye que no hay disminución en el material final.

En la muestra de concreto del 20% se tuvo un módulo de rotura con una disminución del 10% con respecto al concreto con 40% de reemplazo.

En el ensayo de durabilidad nos dimos cuenta que al remplazar el agregado reciclado no tuvo deterioro en sus propiedades mejorando la calidad de las mismas.

La permeabilidad a cloruros durante los 28 días fue similar a la del concreto de control, al cumplirse 56 días el concreto que fue el de remplazo del 40% su permeabilidad fue de 18% muy inferior a la de control.

El ensayo de carbonatación, la resistencia del concreto reciclado fue inferior a la del concreto de control.

El concreto reciclado es una alternativa viable de los agregados naturales usados en la construcción, la experiencia ha mostrado que, con una apropiada planeación, técnicas de

construcción, y pruebas de control, la calidad del concreto reciclado es apropiado. Además, puede controlarse usando muchos de los ensayos realizados para los agregados naturales ya que este tiende a tener mayor índice de absorción en un 4% y menor gravedad específica que los materiales naturales.

Recomendaciones

Según la elaboración de los ensayos realizados para dicho proyecto se puede recomendar el concreto reciclado ya que este se podría convertir, en una alternativa para ser utilizado en obras civiles, y de construcción; ayudando al impacto en el medio ambiente de la generación de escombros que se encuentran, y principalmente para la reducción de costos de materiales de la construcción, generando así una cultura del reciclaje aprovechando los residuos de la construcción.

Se recomienda para futuras investigaciones consolidar toda la información obtenida de construcciones realizadas con concreto reciclable con el fin de generar manuales, guías, documentos, artículos, proyectos de diseño con el uso de concreto reciclado.

Es de gran recomendación en construcciones futuras llevar un monitoreo y verificación del desempeño de las construcciones creadas con concreto reciclado.

Referencia

- Arias F. (2006). *El proyecto de investigación guía para su elaboración*. Caracas Venezuela.
- ARRIAGA TAFHURT LIBARDO ENRIQUE. (2013). *UTILIZACION DE AGREGADO GRUESO DE CONCRETO RECICLADO EN*.
- ASOCIACIÓN CIENTIFICO – TECNICA DEL HORMIGON ESTRUCTURAL (ACHE). . (2006.). *UTILIZACION DE ARIDO RECICLADO PARA LA FABRICACION DE HORMIGON ESTRUCTURAL*, . España,.
- BEDOYA Carlos Mauricio. (1998). *Confección del concreto reciclado mediante el aprovechamiento de residuos de la construcción*. . Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- BOJACA C & Néstor R. (2013). *PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO*,. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, .
- BOJACA Néstor R. (2008.). *CONCRETO SOSTENIBLE COMO ALTERNATIVA ESTRUCTURAL, AMBIENTAL Y ECONOMICA EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES*, . Bogotá D.C.,: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, .
- CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. (sf). *RECICLANDO CONCRETO*. Obtenido de http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf
- García. (2002). *Metodología de la investigación*. Caracas Venezuela.
- Gomez Cortes Jose Gabriel. (2006). *UTILIZACION AGREGADO CONCRETO RECICLADO*.
- Mendez A. (2003). *Aspectos Metodologicos de la investigación*.
- Ministerio de Medio Ambiente. (1993). *ley 99 de 1993*. Obtenido de <https://justiciaambientalcolombia.org/2016/02/08/resumen-de-la-ley-99-ambiental-colombiana/>
- Rincón Juan Carlos. (2013). *USO EFICIENTE DEL CONCRETO RECICLADO*.
- Rivas I. (1995). *Técnicas de documentación e investigación*. Caracas Venezuela.
- RODRÍGUEZ Alvaro L. (2001.). *PROPIEDADES DEL CONCRETO RECICLADO COMO AGREGADO*,. Bogotá D.C., : Universidad Nacional de Colombia, .

SÁNCHEZ DE JUAN. (2005.). *ESTUDIO SOBRE LA UTILIZACION DE ARIDO RECICLADO PARA LA FABRICACION DE HORMIGON ESTRUCTURAL*, . Madrid, España,.

WBCSD . (2003). *Reciclando Concreto*.

Apéndice

Apéndice 1. Materiales utilizados para los ensayos

MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados para la presente investigación fueron:

Cemento

Para el presente proyecto se utilizó cemento portland tipo 1, 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.

Agregado Fino Natural

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

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 Materiales de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Aditivo

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

Relación agua/cemento (A/C)

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

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.

Ambiente de curado

Las probetas se desencofraron veinticuatro (24) horas después de fundidas y posteriormente se sumergieron en agua hasta el día del ensayo.

Edades de ensayo

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

Apéndice 2. Ensayos realizados

Densidad del Cemento

La densidad del cemento desempeña un papel significativo en su producción y funcionamiento.

El permeámetro asociado lo más de cerca posible a la industria del cemento es el aparato de Blaine. Este método requiere a operador embalar una cama del polvo hasta la porosidad del 50%, +/- 0,5% presiones del pulgar que usan solamente. Esto significa que la densidad verdadera del cemento bajo prueba esté sabida, a excepción del cemento de Portland cuando una densidad de 3,15 g/cm³ se asume. A pesar de las dificultades experimentales, el método puede solamente ser tan exacto como el valor de densidad asumió.

Módulo de Finura (M.F)

El módulo de finura, también llamado modulo granulométrico, El módulo de finura se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar y dividiendo la suma entre 100.

Granulometría

Los análisis granulométricos tienen por objetivo determinar las cantidades en las que están presentes partículas de distintos tamaños en los agregados tanto finos (arena) como gruesos

(grava). La distribución de las partículas de los agregados según su tamaño se determina mediante el empleo de cribas, mallas o tamices estándar.

Las muestras de agregado tanto fino como grueso se hacen pasar a través de una serie de tamices, determinándose el porcentaje de material que se retiene en cada tamiz. Los resultados del ensayo análisis granulométrico se reportan llenando la tabla granulométrica del agregado en estudio el cual tendrá que cumplir con la norma técnica NTP 400.012, ASTM C136-5 de agregados las cuales nos indican porcentajes de partículas aceptables para los diferentes tamaños retenidos en los tamices normalizados. Por lo que se reportaran los gráficos de la curva granulométrica del material estudiado junto a los límites que especifica la norma ASTM C 33.

Peso unitario

El peso unitario es el peso de la unidad de volumen de material a granel en las condiciones de compactación y humedad es que se efectúa el ensayo, expresada en (kg/m³).

Densidad y absorción

densidad, la cual está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada.

La absorción en los agregados, es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca.

Coefficiente de Forma

Existen diversos medios aplicables para precisar la forma de la partícula, uno de estos, que es bastante usual, es el denominado coeficiente volumétrico medio, o coeficiente de forma, que es

igual a la relación entre el volumen de la partícula y el volumen de la esfera en que resulta inscrita, cuya determinación es aplicable a las partículas mayores de 6,3 [mm] ($\frac{1}{4}$ ").

Desgaste

Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ "). El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados.

Compresión del concreto

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se puede diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura.

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras.

La resistencia a la compresión se mide tronando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascales (MPa) en unidades SI.

Módulo de elasticidad

de acuerdo a la norma ASTM C-469, el módulo de elasticidad (E_c) se obtiene calculando la pendiente del segmento de recta que pasa por los puntos A y B, para lo cual es necesario obtener del trazo de la curva (o en el transcurso de la prueba) la ordenada correspondiente a las 50 microdeformaciones y la abscisa correspondiente al esfuerzo $0.40f'_c$. De la figura se observa

también que la deformación que corresponde a la resistencia del concreto es 0.002 cm/cm, que corresponde a 2,000 microdeformaciones. Aún después de que el concreto alcanza su resistencia máxima, y si la carga se sostiene (el esfuerzo disminuye) hasta lograr la falla total (el concreto truena), se puede medir la deformación última que soporta el material, ésta deformación es de 0.035 cm/cm.

Flexión

La flexión representa el estado límite de servicio que generalmente rige las dimensiones de las vigas de concreto reforzado. Usualmente, las dimensiones provenientes del diseño por flexión se someten a revisión por cortante u otras acciones estructurales.

Según la Mecánica de materiales, la flexión es el estado interno de esfuerzos cuya acción genera en una sección del elemento flexionado un par de fuerzas M cuya intensidad puede establecerse a partir de las condiciones de equilibrio en vigas isostáticas o de las condiciones de equilibrio y compatibilidad de desplazamientos en el caso de vigas estáticamente indeterminadas.

Sortividad

sortividad (S) es uno de los parámetros relevantes en el estudio de la zona no saturada del concreto. Pueden estimarse mediante el infiltrómetro de altura variable de Philip-Dunne, si se conocen los tiempos de infiltración y el incremento de humedad producido en el concreto tras un ensayo.

Cloruros

El procedimiento consiste en valorar el ion cloruro con nitrato de plata, en presencia de cromato potásico que hace de indicador de la reacción. Es una aplicación del método clásico volumétrico de Mohr. A la vez que el ion cloruro se aprecian el ion bromuro, yoduro y sulfuro.

El método es aplicable a agua que contengan al menos cinco partes por millón de ion cloruro. Debiendo eliminarse antes del ensayo los sulfitos, así como cualquier color oscuro o enturbiamiento del agua.

Carbonatación

La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado. La corrosión por la carbonatación tiende a desarrollarse más tarde, el proceso es más lento que la corrosión por cloruros, y conduce a una corrosión uniforme del acero que acelera la formación de grietas y reduce la vida útil de servicio de la estructura. En ambientes tropicales no marinos, la corrosión por carbonatación podría ser el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado. Sin embargo, el proceso de carbonatación natural es muy tardado y un proceso acelerado es necesario para obtener datos en menor tiempo

Sulfatos

los sulfatos representan uno de los mayores riesgos de agresión química para el hormigón las reacciones químicas que incluyen la formación de productos expansivos en el hormigón o mortero ya endurecido pueden dar lugar a efectos perjudiciales, ya que la expansión puede producir tensiones mecánicas internas que, eventualmente, se traducen en deformaciones y desplazamientos en diferentes partes de la estructura, en la aparición de grietas y fisuras, desconchados, etc.

Apéndice 3. Evidencias fotográficas





















