

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y A LA FLEXIÓN EN
CONCRETOS DE 28 MPa (4000 PSI) CON AGREGADO RECICLADO Y CENIZA
VOLANTE, PARA UNA RELACIÓN A/C 0.50**

SEBASTIÁN ARIAS GIL

JOHN JAIRO MARTINEZ BARRERO

CRISTIAN DAVID TORRES BELLO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

BOGOTA D.C.

2017

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y A LA FLEXIÓN EN
CONCRETOS DE 28 MPa (4000 PSI) CON AGREGADO RECICLADO Y CENIZA
VOLANTE, PARA UNA RELACIÓN A/C 0.50**

SEBASTIAN ARIAS GIL

JOHN JAIRO MARTINEZ BARRERO

CRISTIAN DAVID TORRES BELLO

PROYECTO DE GRADO

ASESOR DISCIPLINAR ING. ARNOLD GIUSEPPE GUTIÉRREZ TORRES

ASESOR METODOLÓGICO LIC. LAURA MILENA CALA CRISTANCHO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

BOGOTA D.C.

2017

Agradezco primeramente a Dios por bendecirme y por ponerme en el lugar en el que me encuentro hoy, sin Él ni siquiera la vida sería posible y por Él es que hoy puedo alcanzar esta nueva meta, la gloria y la honra es toda para Dios. También agradezco a mi madre, quien no sólo me dio la vida, sino que durante todos estos años me ha enseñado el valor que tiene esta y lo importante que es hacer las cosas bien, es por eso que, durante el desarrollo de este proyecto, ella sirvió como inspiración para mí y más en los momentos difíciles que también fue un gran apoyo. No puedo dejar de agradecerle a mi padre, que, aunque no ha podido estar presente en todos mis logros, siempre se ha preocupado por mí y porque todo siempre me salga bien, agradezco a él por su apoyo emocional, por su apoyo económico y por siempre confiar en mí.

Agradezco profundamente a nuestros dos asesores, al ingeniero Arnold Gutierrez y a la profe Laura Cala, por su paciencia y por su apoyo constante en todo este proceso tan importante. No puedo olvidarme de mis dos compañeros, porque gracias a ellos, este proceso hoy culmina y de la mejor manera, gracias a ellos por siempre buscar la excelencia junto conmigo y por su amistad, que sin ese valor fundamental este trabajo no hubiera sido tan enriquecedor. Por último, agradezco a todos los amigos y compañeros que siempre estuvieron ahí, que con su apoyo y palabras de aliento, nos ayudaban a salir adelante en los momentos más difíciles, gracias por tantas experiencias y por brindarme su amistad y su confianza. No hay nada más gratificante que encontrar personas maravillosas en el camino, que lo hagan más divertido, emocionante y lleno de experiencias inolvidables.

A todos gracias.

¡Sebastián Arias Gil!

Agradecido con Dios y la vida por la familia que tengo, son mi mayor motivación para este proceso que empecé hace varios años, a mi mamá, mujer hermosa que siempre me ha apoyado en las buenas y en las malas, que sin su sacrificio no sería la persona que soy, a mi padrastro que siempre me ha apoyado en especial a mi padre que está allá en el cielo protegiéndome; gracias a ustedes por tanto amor y paciencia con todo lo que sueño. A mis dos hermosas gaticas que las amo demasiado y a mi novia por darme ese amor, confianza y valor; esto es para ustedes.

A mis amigos, por enseñarme el valor que tiene la amistad, por cada minuto que se pasó en el aula y las carcajadas que nunca faltaron.

Agradecerle al Ingeniero Arnold Giuseppe por todos los consejos que me brindo como docente de Colegio y Universidad.

Por último, darle las gracias a mis dos compañeros que realizamos éste trabajo de grado, dado que sin su apoyo no se hubiese logrado este gran objetivo.

Mil Gracias a Todos

¡John Jairo Martinez Barrero!

Cada vez que pasa el tiempo, se trazan metas y sueños, como objetivos personales que se convierten en una tarea que se debe alcanzar, que, con esfuerzo, dedicación, sacrificio, y con la ayuda de diferentes personas se logre llegar a lo más alto de nuestros propósitos. Por eso, mediante estas líneas deseo expresar mi sincero agradecimiento a aquellas personas que orientaron y colaboraron con el presente trabajo de investigación, en especial a la Lic. Laura milena Cala asesora metodológica, por la orientación, seguimiento y por el apoyo recibido a lo largo de esta investigación, Además, agradezco al Ingeniero Arnold Gutiérrez director de esta investigación, que con su supervisión, ayuda y sus amplios conocimientos en el campo, permitieron que cada paso de este trabajo se culminara con éxito.

Quiero agradecer a mis padres, que con su apoyo incondicional y por no desvanecer a diferentes adversidades, y debido a su constante sacrificio permitieron que día a día me formara y cumpliera mis sueños, sus palabras de aliento en el camino sirvieron para que no desfalleciera en esta formación como ingeniero.

No podía dejar de agradecer a mis hermanos que con su compañía amor y comprensión en cada uno de mis trasnochos comprendieron que el ser ingeniero

era mi sueño y mi objetivo, gracias a ellos por cada uno de sus abrazos que me fortalecían día a día para ser cada vez mejor.

También agradezco a mi abuelita Betty que con el pasar de los días se alegraba porque su nieto estuviera en una universidad, a ella dedico cada uno de mis triunfos alegrías y tristezas debido a su apoyo incondicional que me ha brindado no solo en mi paso universitario, si no por el amor que me ha brindado de por vida.

Agradezco a mi novia Laura Ramírez una de las personas que vivió de cerca este proceso, sus palabras y su apoyo sirvieron para que cada vez creyera que si podía alcanzar mis objetivos.

Agradezco a mis compañeros de tesis, que cada día se convirtieron en mis hermanos, cada risa, malgenio sirvieron para fortalecer nuestra amistad.

Por último, agradezco a mi tío Luis Carlos Bello, una de las personas que se alegraba por escuchar que culminaba cada semestre, aquella persona que veía todas las noches en mi trabajo gracias a él por su colaboración. También a mis tías primos y sobrinos que permitieron que creyera en mí mismo, por su comprensión, y por su compañía en este nuevo paso que doy.

No creo que sea posible enumerar a un sinfín de personas que quiero y aprecio, Llevo en mi pensamiento y corazón a todos mis compañeros que desde primer semestre estuvieron conmigo, y a los que en cada paso de esta carrera conocí, gracias y mil gracias por cada risa, abrazo, y compañía durante este proceso.

¡Cristian David Torres David!

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos aquellos que hicieron parte de este proceso de aprendizaje, a Dios por el amor, la bondad y la paciencia necesaria para terminar esta etapa, a la Universidad La Gran Colombia por dejarnos ser parte de ella, pero sobre todo a la Facultad de Ingeniería Civil; ha sido un camino largo, pero muy fructífero, lleno de memorias y experiencias.

Al ingeniero Arnold Gutiérrez Torres, por adoptarnos como sus pupilos en esta última etapa, por regalarnos parte de su tiempo, experiencia y motivación para tan gran labor.

A la profesora Laura Milena Cala, por ser tan paciente con nosotros, éste logro se lo debemos mucha a su sabiduría y experiencia dado que sin ellos no se hubiese logrado el objetivo.

Gracias a todos y en especial a laboratorista Carolina que aportó su granito de arena para alcanzar este logro que hoy con tanto sacrificio culmina.

A los amigos, a la familia que hoy siguen con nosotros para celebrar tan magnifico triunfo. Mil y mil gracias.

CONTENIDO

SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS	1
INTRODUCCIÓN	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	5
2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. OBJETIVOS.....	23
3.1. OBJETIVO GENERAL	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. MARCO REFERENCIA	24
4.1. MARCO TEÓRICO	24
4.1.1. Masas Unitarias o Peso Unitario.....	24
4.1.2. Granulometría.....	26
4.1.3. Forma	28
4.1.4. Textura	28
4.1.5. Cemento.....	28
4.1.6. Clasificación del Cemento Portland	29
4.1.7. Pasta de Cemento	31
4.1.9. Agregados Reciclado.....	32
4.1.10. Peso específico o densidad	33
4.1.11. Propiedades del Concreto Endurecido	34
4.1.12. Capacidad de absorción.....	35
4.1.13. Agua	35
4.1.14. Resistencia	36
4.1.15. Diseño de mezcla método grafico	37

4.1.16. Ceniza Volante.....	40
4.1.17. Composición química de la ceniza volante	41
4.1.18. Características de las partículas de ceniza volante	42
5.2. MARCO CONCEPTUAL	44
5.3. MARCO LEGAL	46
4.1.19. Propiedades mecánicas del concreto	51
6. DISEÑO METODOLÓGICO.....	54
6.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	55
6.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN	55
6.4. HIPÓTESIS.....	55
6.5. MUESTRA	56
6.6. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	57
6.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	58
6.8. FASES DE LA INVESTIGACIÓN	58
6.8.1. Fase 1.....	58
6.8.2. Fase 2.....	59
6.8.3. Fase 3.....	59
6.8.4. Fase 4.....	60
6.9. MATRIZ DE ENSAYOS.....	61
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
7.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL EL CEMENTO, LA CENIZA VOLANTE Y LOS AGREGADOS NATURALES Y EL AGREGADO GRUESO RECICLADO, DE ACUERDO A LA NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC).	62
7.1.1. Cemento Portland	63
7.1.2. Ceniza Volante.....	70
7.1.3. Agregado Grueso Natural.....	76
7.1.4. Agregado Grueso Reciclado.....	84
7.1.5. Agregado Fino	92

7.1.6. Morteros.....	98
7.2. FASE 2: PROPUESTA DEL DISEÑO DE MEZCLA PARA CILINDROS DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO.....	100
7.2.1. Selección del asentamiento	100
7.2.2. Selección del tamaño máximo del agregado.....	100
7.2.3. Estimación del contenido de aire	100
7.2.4. Estimación del contenido de agua de mezclado.....	101
7.2.5. Determinación de la resistencia de diseño.....	101
7.2.6. Selección de la relación Agua-cemento.....	101
7.2.7. Estimación del contenido de cemento	102
7.2.8. Proporción de agregado.....	102
7.2.9. Corrección por humedad de los agregados	104
7.2.10. Dosificación de materiales con pesos secos	107
7.3. FASE 3: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO CON DIFERENTES PROPORCIONES DE AGREGADO RECICLADO	113
7.4. FASE 4: DISEÑO DE MEZCLA Y ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y A LA FLEXIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMO CON UNA ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE	117
7.4.1. Diseño de mezcla porcentaje de sustitución óptimo	117
7.4.2. Preparación mezcla de concreto para fundir cilindros y viguetas ..	119
7.4.3. Ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión del concreto con porcentaje de sustitución óptimo y adición de ceniza volante.....	121
8. CONCLUSIONES	123
9. RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curva de gradación Fuller - Thompson	27
Figura 2 Método Grafico.....	39
Figura 3 Diagrama de Procesos.....	54
Figura 4 Matriz de ensayos	61
Figura 5 Frasco Le Chatelier	63
Figura 6 Tamiz N°200 y la muestra Figura 7 Muestra pasa Tamiz N°200	65
Figura 8 Lectura inicial de tiempo de fraguado de la pasta de cemento	68
Figura 9 Penetración vs Tiempo.....	69
Figura 10 Tiempo de Fraguado de la Ceniza Volante	73
Figura 11 Granulometría Agregado Grueso Natural %Pasa vs Tamices	83
Figura 12 Granulometría Agregado Reciclado %pasa vs Tamiz mm	91
Figura 13 Tamices para agregado fino.....	95
Figura 14 Granulometría Agregado Fino %pasa vs Tamiz mm.....	97
Figura 15 Mortero con Ceniza después de la falla a Compresión	98
Figura 16 Proporción con agregado natural	103
Figura 17 Proporción agregado reciclado	104
Figura 18 Cilindros Fundidos.....	111
Figura 19 Cilindros sumergidos en la pileta	112
Figura 20 Resistencia a la compresión de los 5 porcentajes de sustitución.....	116
Figura 21 Cilindros porcentaje óptimo y ceniza volante	119
Figura 22 Viguetas porcentaje óptimo y ceniza volante	120
Figura 23 Muestras sumergidas en la pileta.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de agregados reciclados y aplicaciones	14
Tabla 2 Valores de las constantes que representan la parte elíptica de la ecuación	27
Tabla 3 Límites de gradación recomendados para granulometrías continuas en porcentaje que pasa para distintos tamaños máximo agregado	38
Tabla 4 Requerimientos químicos de la ceniza volante	42
Tabla 5 Marco Legal.....	46
Tabla 6 Definición y Operación de Variables.....	57
Tabla 7 Densidad Cemento Portland Argos	64
Tabla 8 Datos para obtención de Consistencia y Tiempo de Fraguado	67
Tabla 9 Registro de penetración y tiempo de fraguado de la pasta de Cemento ..	68
Tabla 10 Densidad Ceniza Volante	70
Tabla 11 Consistencia Ceniza volante	71
Tabla 12 Tiempo de Fraguado del 20% ceniza y cemento portland.....	72
Tabla 13 Resultados ensayo FRX.....	74
Tabla 14 Masa Unitaria Suelta agregado grueso natural	77
Tabla 15 Masa Unitaria Compacta Agregado grueso natural.....	78
Tabla 16 Pesos del ensayo densidad y absorción	80
Tabla 17 Granulometría de Agregado Grueso	82
Tabla 18 límites para agregados gruesos de TM de 1" NTC 174.....	84
Tabla 19 Masas Unitarias sueltas del Agregado Reciclado	85
Tabla 20 Pesos de las muestras para Densidad y % Absorción	87
Tabla 21 Densidad Aparente Seca del Ag. Reciclado.....	88
Tabla 22 Granulometría Agregado Reciclado	90
Tabla 23 Masa unitaria suelta agregado fino.....	92
Tabla 24 Masa unitaria compactada agregado fino.....	93
Tabla 25 Datos tomados en el Laboratorio	94
Tabla 26 Granulometría del Agregado Fino	96

Tabla 27 Norma Icontec NTC 174 para Agregado Fino	96
Tabla 28 Promedio de Resistencias de diferencias días	99
Tabla 29 Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.....	101
Tabla 30 Humedad natural para los tres días que se realizó la mezcla	105
Tabla 31 % Absorción de cada agregado	105
Tabla 32 Peso seco para cada diseño	106
Tabla 33 Corrección de la cantidad de agua por humedad de los agregados	106
Tabla 34 Peso húmedo de los agregados.....	107
Tabla 35 Diseño concreto sin agregado reciclado.....	107
Tabla 36 Diseño 25% agregado reciclado.....	108
Tabla 37 Diseño 50% agregado reciclado.....	108
Tabla 38 Diseño 75% agregado reciclado.....	108
Tabla 39 Diseño 100% agregado reciclado.....	109
Tabla 40 Diseño definitivo sin agregado reciclado	109
Tabla 41 Diseño definitivo 25% agregado reciclado.....	110
Tabla 42 Diseño definitivo 50% agregado reciclado.....	110
Tabla 43 Diseño definitivo 75% agregado reciclado.....	111
Tabla 44 Diseño definitivo 100% agregado reciclado.....	111
Tabla 45 Resistencia a la compresión cilindros de concreto	114
Tabla 46 Peso seco y volumen absoluto diseño óptimo.....	117
Tabla 47 Agua de diseño y sobrante o faltante de agua	118
Tabla 48 Peso húmedo agregados	118
Tabla 49 Dosificación materiales para cilindros y viguetas	119
Tabla 50 Resistencia a la compresión % óptimo con adición de ceniza volante .	121
Tabla 51 Resistencia a la flexión teórica	122
Tabla 52 Resistencia a la flexión obtenida	122

SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius
%	Porcentaje.
A/C	Relación agua/cemento.
ACI	American Concrete Institute.
ACR	Agregado de concreto reciclado.
ACR	Agregado de concreto reciclado.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CP	Cemento portland.
Ec	Módulo de elasticidad del concreto.
gr/cm³	gramos/metro cubico (Densidad).
Kg/m³	Kilogramos/ metro cubico.
KN	Kilo Newton.
Mpa	Mega pascales.
MR	Módulo de rotura.
NTC	Norma técnica colombiana.
Ps	Peso seco.
PSI	Pounds force per square inch (libra fuerza por pulgada cuadrada).
Psss	Peso saturada superficialmente seca.
RC	Resistencia a la compresión.
RCD	Residuos de construcción y demolición
RF	Resistencia a la flexión.
Vps	Volumen de poros saturables.
ρ	Rho (peso específico).

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, se utilizan materiales que provienen de la explotación de materias primas. Estos materiales, son recursos no renovables que generan un gran impacto al medio ambiente, requiriendo un gran consumo de energía para su extracción y afectando el entorno de los ecosistemas en los que se desarrollan estas materias primas. Además de esto, el concreto de la construcción y demolición (RCD) de estructuras es desechado, cuando este concreto podría ser utilizado como agregado para concreto estructural nuevo, es por esa razón que se decide realizar esta investigación de concreto con agregado reciclado.

La presente investigación, pretende estimar el porcentaje de sustitución óptimo de agregado natural por agregado reciclado, que, para una mezcla de concreto, permita llegar a resistencias similares o superiores a las que se obtendrían con un concreto convencional, sin agregado reciclado. Además, se pretende analizar el comportamiento mecánico de este porcentaje de sustitución óptimo, en un concreto con adición de ceniza volante.

Para poder determinar este comportamiento mecánico, primero se realizó la caracterización de los materiales utilizados en el concreto, agregados, naturales y reciclado, cemento, ceniza volante, pasta de cemento y se realizaron cubos de mortero para determinar el comportamiento mecánico cuando se tiene una adición de ceniza, en comparación con un mortero convencional.

Con los datos de la caracterización de los materiales, se realizó el diseño de mezcla para cada porcentaje de sustitución (0%, 25%, 50%, 75% y 100%), para fundir cilindros de concreto y realizar los ensayos de resistencia a la compresión.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la ciudad de Bogotá actualmente no se han desarrollado suficientes, ni muy eficaces planes y/o plantas de reciclaje o tratamiento de los escombros de concreto producidos por las construcciones, demoliciones y demás actividades en las obras civiles, producto de esto, se está haciendo un mal uso de los rellenos sanitarios en la ciudad, dado que en ciudades como “Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira y Armenia, se generan alrededor de 100.000 Ton/día de RCD”¹. De estos residuos, cerca del 98% se pueden separar y reutilizar, pero se está desaprovechando la oportunidad de generar nuevas materias primas a partir de los escombros del concreto, al desechar casi en su totalidad estos residuos y por esta razón se están sobre explotando las canteras de agregados cercanas a las ciudades, afectando en gran medida el medio ambiente. Prueba de esto es que “el país es el décimo productor de agregados pétreos. Con una producción anual de 160 millones de toneladas no sólo supera a países como Italia, Bélgica, España y Chile, sino que convirtió a este subsector en el más prolífico del sector minero del país.”² Agregados que podrían ser sustituidos por los reciclados.

El reciclaje de las materias primas en la ciudad de Bogotá, ha tomado un papel muy importante para evitar agentes agresivos de contaminación; lo cual ha generado puntos de discusión por la falta de cuidado y sentido de pertenecía con la ciudad, es por eso que se vuelve de vital importancia evitar al máximo la contaminación y aún más la que provocan los escombros de concreto en diferentes obras civiles; debido a que el auge de la civilización moderna, confronta

¹ Expo residuos 2015, Aprendizaje aplicado y la estructuración de proyectos y negocios, con enfoque innovador, para la generación de riqueza, sostenibilidad ambiental y equidad social en los municipios del país. [En línea]. 2017 [consultado 24 de junio de 2017]. Disponible en internet: <http://m.elcolombiano.com/exporesiduos-2015-aprendizaje-y-negocios-JH1922487>

² El buen momento de los materiales. [En línea]. Mundo minero. 17 de agosto de 2016. Bogotá. Párr. 1. [Consultado: 10 de septiembre de 2017]. Disponible en internet: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>

a la sociedad a realizar más construcciones que puedan soportar el crecimiento de la ciudad de Bogotá y que sean sostenibles. Para lograr este objetivo, es necesario realizar estudios e investigaciones que permitan estimar el potencial de materiales reciclados como el concreto de demolición, en la construcción de nuevas obras civiles.

Está claro que el concreto es hoy en día el material más empleado en cualquier obra de construcción, tanto así que se ha convertido en el segundo material más empleado después del agua, teniendo en cuenta que el agua también se utiliza para la producción de concreto. Es ahí donde deben surgir nuevos métodos e ideas que permitan en primera instancia, mitigar y contrarrestar los agentes contaminantes producidos en la elaboración de este material; también, que permitan utilizar materiales que son comúnmente desechados por la misma industria de la construcción, en sustitución de las materias primas como agregados pétreos y cemento principalmente que para su producción, requieren de la explotación de macizos rocosos y de un gran consumo de energía, como en el caso del cemento que requiere hornos con temperaturas entre los 1000 y los 1500°C.

1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la proporción adecuada de agregados reciclados en el comportamiento mecánico de un concreto estructural de 28 MPa con adición de ceniza volante para una relación de A/C de 0,50?

2. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de la investigación, se realizaron consultas a diferentes trabajos de gado y artículos, que abordaban diversos aspectos y características a estudiar en el concreto con agregado reciclado y Ceniza Volante (CV), los documentos consultados y los resultados obtenidos en ellos, fueron los siguientes:

- Hoy por hoy la importancia de disminuir los agentes contaminantes que emiten los compuestos del concreto ha tomado gran relevancia, es debido a esto que se fundamentó la investigación del estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado empleada por el Ingeniero William Garzón Pire. El ataque químico al concreto es uno de los factores que afectan la durabilidad de los mismos. “Dentro de estos químicos, uno de los que se considera más perjudicial es el Sulfato de Magnesio; este afecta directamente al Aluminato Tricálcico presente en el cemento; Esta acción se puede ver incrementada en concretos con mayores contenidos de cemento, y aún más cuando este, se presenta también en los agregados de la mezcla”³.

La principal importancia, es de contribuir con el medio ambiente disminuyendo los diferentes agentes químicos que hacen que el concreto emita partículas contaminantes al medio ambiente. Basándose en esta hipótesis, y usando como herramienta las Normas de ensayos de expansión, se realizaron inmersiones de muestras de concreto con agregado reciclado en una solución de sulfato del 5%, teniendo como variables el porcentaje de reemplazo de agregados, la relación agua/material cementante y reemplazo con CV, teniendo en cuenta que esta última genera menor permeabilidad en los concretos y mayor resistencia al ataque

³ GARZÓN PIRE, William. Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos al concreto con agregado reciclado [en línea]Colombia: U nacional de Colombia, Maestría en construcción, 2013. 4 p. [citado 10 Sep., 2016]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/9496/1/garzonpirewilliam.2013.pdf>

de los sulfatos. “Así mismo se produjeron muestras para determinar las resistencias de cada una de las variables a estudiar, y posteriormente comparar las muestras curadas en la solución de sulfatos con las que se curaron con inmersión en tanque. Producto de estos ensayos se evidenciaron mayores expansiones en las muestras con mayor relación agua/material cementante, pero que en la mayoría de los casos se disminuía con la adición de ceniza volante en la mezcla. Para mezclas con menores relación A/C. se evidenciaron menores expansiones, pero a su vez menores resistencias y en las muestras con adición de cenizas, menor manejabilidad del concreto.”⁴

Esta investigación está fundamentada directamente con las propiedades físicas y mecánicas del cemento que desde el siglo XX, aparece los primeros indicios de un concreto reciclado, exactamente en Europa donde se tienen los primeros registros de reciclar y mejorar la resistencia a compresión y flexión, buscando resultados pertinentes y favorables para la durabilidad del concreto, basándose en las normas pertinentes para no infringir en ningún resultado.

- El desarrollo y el aumento poblacional en la última década ha generado grandes cambios dentro del país, concibiendo con los estudios del Ingeniero Ernesto Iván Marroquín en su tesis titulada reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas, publicada en el año 2012 “El sistema convencional utilizado para un correcto manejo de los residuos sólidos generados por los escombros, comprende una serie de etapas operacionales desde que se generan los desechos, la evacuación segura y fiable, almacenamiento, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final”⁵.

⁴ IBID., p. 15

⁵ MARROQUÍN, Ernesto. Reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas [en línea] Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2012. 11 p. [citado 10 Sep., 2016] Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3425_C.pdf

Hace pocos años la infraestructura era aceptable para la cantidad de habitantes que se encontraban dentro de cada ciudad, la comunicación y la accesibilidad a diferentes productos, hicieron que la humanidad pensara en formas y en estudios para poder conectarse con todo el país, sin tener ninguna restricción terrestre, e implementando los medios para que productos agrícolas, textiles, materias primas pudiesen llegar hasta el último rincón del territorio colombiano. Al haber incremento de población, la malla estructural y de vivienda aumentaron, lo que generó imponer más construcciones de cemento y así mismo acabar con la poca vegetación y biodiversidad que hay en las ciudades.

Anteriormente los residuos producidos en las construcciones eran depositados en superficies terrestres no permitidas y en algunos casos en los océanos. Los vertederos han sido el método más económico y ambientalmente aceptable para la evacuación de residuos sólidos en todo el mundo. Lo que implica planificación, diseño, explotación, clausura y control de vertederos. Los desechos de los concretos se depositan en barrancos, predios baldíos, cuencas hidrográficas, perjudicando a la salubridad del medio ambiente, con la acción de construir y derribar genera un volumen importante de residuos

Ahora bien, el principal componente de toda construcción es el cemento y consigo mismo el agua, en donde la mezcla de cemento, agregados gruesos, agregados finos, y de la misma agua pasan por el proceso de hidratación, el concreto endurecido ha pasado del estado plástico al estado rígido, Antes de su total endurecimiento, la mezcla experimenta dos etapas dentro de su proceso general que son, el fraguado inicial y el fraguado final.

Con lo mencionado anteriormente, el trabajo de investigación para sustituir el agregado grueso natural por uno reciclado se realizó con base a la normativa ASTM, por lo cual se caracterizaron física y mecánicamente los materiales, para que posteriormente se llevara a cabo un diseño de mezcla encontrando una

dosificación adecuada; posteriormente realizo los ensayos de resistencia a la compresión, para realizar una comparación entre un concreto convencional y uno con agregado reciclado. Encontrando que “La resistencia a compresión del concreto reciclado no alcanzó la requerida en el diseño teórico, debido a la demanda en la cantidad de agua, disgregación de partículas y cantidad de finos (tamiz 200), disminuyendo también el contenido de aire”⁶ y que la velocidad de endurecimiento en el concreto reciclado fue mayor a la del concreto estructural convencional, debido a que se está trabajando con componentes de cemento fraguado en una dosificación con contenido de cemento sin reacción química.

- La construcción y la renovación de la infraestructura, hace necesaria la intervención de ingenieros y arquitectos para la apropiación y diseño de una urbanización renovada e innovadora, utilizando como materia prima y material primordial el concreto, pero al aumentar la población se hace aún más difícil satisfacer la oferta y demanda lo que ha generado aumentar el uso del concreto, pero al hacer esto, se evidencia que este material emite grandes cantidades de partículas que contaminan el medio ambiente.

La investigación planteada por los ingenieros Jorge cruz García y Ramón Velásquez Yáñez en su tesis titulada Concreto reciclado mencionan que “El empleo del concreto reciclado data de tiempos posteriores la segunda guerra mundial, donde los europeos enfrentaban gran acumulación de escombros, motivo por el cual se decidieron a reciclar dichos desperdicios y utilizarlos como material de construcción”⁷. Motivo por el cual, se decide mitigar el impacto generado por el concreto, buscando reducir sus agentes contaminantes, utilizando escombros que

⁶ IBID., p. 13

⁷ CRUZ GARCÍA, Jorge Arturo. Concreto reciclado [en línea]. México: instituto politécnico nacional, facultad de ingeniería y arquitectura, 2009. 10 p. [citado el 10 de Sep. 2016]. Disponible en: http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4860/284_CONCRETO%20RECICLADO.pdf?sequence=1

por diferentes motivos ya sea abandonos o demoliciones de estructuras que ya no son funcionales se puedan reutilizar gran cantidad de materiales, obteniendo como resultado la disminución de desperdicios de materiales, y ajustarlos nuevamente a las propiedades mecánicas y físicas propias para que sean de uso propicio a la hora de realizar nuevas edificaciones.

“En 1946 Gluzhge investigo en Rusia el uso de desechos en concreto como agregado, encontrando que dichos agregados tenían un peso específico menor que el del agregado natural, y que el concreto elaborado con dicho agregado de concreto demolido tenía una baja resistencia a la compresión.”⁸

Para lograr determinar el comportamiento de un concreto reciclado se realiza en primera instancia una caracterización de materiales, para que posteriormente se pueda comparar un concreto normal con un concreto reciclado, analizando cada una de las propiedades físico mecánicas; para la obtención de agregado reciclado los ingenieros Jorge cruz García y Ramón Velásquez Yáñez realizan un procedimiento de limpieza y reducción de tamaño, esta reducción se logra por medio de un triturado primario para que posteriormente se separen fragmentos ferrosos así mismo las impurezas son más fáciles de retirar. Al tener el agregado reciclado realizan pruebas en el laboratorio teniendo en cuenta la norma ACI, donde la proporción de sustitución de agregado reciclado fue la misma que de agregado natural. teniendo como resultado, que el comportamiento de un concreto reciclado en el ensayo de resistencia a la compresión es menor que uno convencional.

- Los productos industriales son una alternativa de desarrollo, que hoy en día son un medio de contaminación, por las fuentes de empleo y las cantidades producidas a diario por las industrias, por eso, la importancia de reciclar y de aprovechar al máximo los desperdicios generados a partir de la producción de una

⁸ IBID., p. 11

materia prima; uno de estos materiales son las cenizas volantes, producidas a partir de la producción de termo eléctricas “ Una de las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos industriales, es su incorporación a los materiales de construcción y concretamente al cemento, dando lugar a un nuevo tipo de cemento denominado “cemento compuesto”, según Taylor (1990) o “cemento de adición” según Mehta (1986)”⁹.

Mediante estas investigaciones con la ceniza volante se han logrado establecer diferentes parámetros de uso bajo los términos de conductividad hidráulica, las cenizas volantes a los materiales de construcción con base cemento, data de mediados del siglo XX la hidratación de las cenizas volantes, en presencia del cemento Portland, transcurre en tres etapas: Inmediatamente después del amasado con el agua, la segunda etapa cinética, es la llamada de inducción o incubación y la tercera etapa y principal, es la lenta reacción puzolánica.

- La industria de la construcción durante el transcurso de la historia, ha sido una actividad de gran importancia, permitiendo encontrar avances importantes brindando un constante desarrollo. Es por eso, que esta industria busca establecer materiales competentes en la utilización de concretos, que sean óptimos y a su vez que cumplan con las normas establecidas. Hoy en día la producción y el uso de cementos ha alterado al medio ambiente, esto ha hecho que se busquen materiales cementantes alternativos, que aporten nuevas cualidades al concreto y a la vez que contribuyan al ahorro energético y a la disminución de la emisión de contaminantes, propias de la producción del cemento portland.

“considerando que la producción anual de cemento es de más de 1,600 millones de toneladas con la respectiva emisión de CO₂ y la emisión total de CO₂ es de

⁹ LORENZO GARCIA, paz influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado, Madrid España. Facultad de ciencias químicas 1993. 12 p. [citado 10 junio., 2017]. Disponible en: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0024801.pdf>.

23,000 millones de toneladas al año, la producción de cemento contribuye con el 7% de la emisión total de CO₂ a la atmósfera”.¹⁰

Uno de los materiales que se ha estudiado como un cementante complementario del cemento es la ceniza volante, que al ser un desperdicio de las termoeléctricas en la producción de energía a partir de la quema de carbón que son provenientes de materiales naturales de origen volcánico; En 1981 Danshen y Yinji resumen los resultados de investigaciones previas y proponen la hipótesis de los “Efectos de la ceniza volante”, ellos consideraron que la ceniza volante tiene tres efectos en el concreto: el morfológico, el activo y el efecto de micro agregado. El concreto con alto contenido de ceniza volante fue desarrollado por CANMET (Canadá Centre for Mineral and Energy Technology) en los 80's. En este concreto de alto desempeño se reemplazó del 55% al 60% del cemento Portland por ceniza volante clase F, se usaron relaciones agua / cementantes del orden de 0.3 ± 0.02 , con contenidos de cemento portland y ceniza volante de alrededor de 150 a 225 kg/m^{3*} (¹¹), los consumos de agua se mantuvieron alrededor de 120 kg/m^{3*} y se lograron trabajabilidades aceptables con dosificaciones altas de súper plastificantes, generalmente de 3 a 6l /m^{3*}. Este tipo de concreto tuvo excelente desempeño de durabilidad a largo plazo y propiedades mecánicas favorables (N. Bouzoubaa, B. Fournier; 2002).

- Debido al constante crecimiento industrial y de infraestructura en general, lo que para su producción y construcción se emplean materiales naturales producidos de diferentes explotaciones de canteras, y a su vez la abundante producción de cemento; a partir de crear una civilización desarrollada y moderna se ha tenido que emplear nuevos espacios para la ubicación de estructuras de

¹⁰ VASQUES PANIAGUA, ERIC. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE [en línea] México: Universidad nacional Autónoma de México, Maestría en ingeniería, 2007. [citado junio. 2016]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1705/vasquezpaniagua.pdf?sequence=1>

¹¹ Esta denominación, representa la masa utilizada en kg por cada m³ de hormigón fundido.

vivienda, hospitales, centros comerciales, vías, estaciones de servicio etc. gran cantidad de dichos espacios están en zonas que ambientalmente son vulnerables. debido a esto se hace necesario la intervención de los estudios del ingeniero Juan Camilo Escandón Mejía, en la investigación titulada diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de Bogotá. Resaltando que la ciudad de Bogotá no tiene una conciencia de aprovechar al máximo los materiales, como lo es de reciclar, “Mientras en diversos países del mundo igualmente afectados por el impacto de los RCD(residuos de construcción y demolición) se aprovecha una gran parte de los RCD(residuos de construcción y demolición) que se generan, en Colombia no solo se tienen porcentajes casi nulos de aprovechamiento de RCD, sino que se presentan grandes y abundantes problemas solo con la gestión adecuada de estos. A pesar de que existen documentos, normas, resoluciones, leyes y guías para la gestión adecuada de estos residuos, el control del cumplimiento de estos es ineficiente y los RCD (residuos de construcción y demolición) terminan en zonas públicas o botaderos ilegales”¹². Acontecimiento preocupante, debido a que el entorno se está viendo afectado, por ello la necesidad de más zonas de disposición de residuos de construcción y demolición.

Para el manejo y disposición de residuos generadores de escombros la secretaria distrital de ambiente (2008) proporciona una cartilla que especifica” son generadores de escombros las personas naturales o jurídicas, que realicen obras civiles de construcción o demolición, de carácter privado o público y quienes realizan remodelaciones locativas; Tipo 1: Generadores de escombros de excavación - Tipo 2: Generadores de escombros de construcción - Tipo 3: Generadores de escombros de demolición - Tipo 4: Generadores de sedimentos -

¹² ESCANDON MEJIA, JUAN. DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN EDIFICACIONES EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. [en línea] Bogotá: Pontificia universidad javeriana, Pregrado en ingeniería civil, 2011. [citado septiembre. 2016]. Disponible en: <file:///D:/U%20La%20gran%20colombia/tesis/tesis603.pdf>

Tipo 5: Generadores por remodelación”¹³, con el fin de garantizar el cumplimiento en la disminución del impacto ambiental se hace responsabilidad a los generadores de escombros, transportadores, y receptores.

Para el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición se hace específico el manejo de concreto representado en la siguiente tabla:

Tabla 1 Tipos de agregados reciclados y aplicaciones

RCD	Tipo de Agregado	Aplicación	Recomendaciones
Concreto	Agregados finos y gruesos producto de la separación y trituración de residuos de concreto y mortero, sin contenido de materia orgánica, metales o residuos peligrosos	Concreto Hidráulico	Pueden realizarse mezclas hasta con 100% de agregado reciclado.
			Para elementos estructurales se recomienda un máximo de 20% de sustitución.
			El agregado debe estar totalmente saturado de agua para evitar que su alta tasa de absorción disminuya la manejabilidad de la mezcla.
			Para obtener buenos resultados se requieren relaciones a/c bajas del orden de 0.4
			Es recomendable el uso de aditivos plastificantes para garantizar la manejabilidad y disminuir la retracción por secado.
		Bloques y ladrillos de Concreto prefabricados	Se pueden realizar mezclas de concreto para estos elementos con una 55 y un 25% de agregados gruesos y finos reciclados respectivamente
		Se recomienda el uso de aditivos plastificantes para disminuir la porosidad, aumentar la densidad y mejorar la durabilidad del elemento.	

“Finalmente la aplicación de los agregados reciclados (AR) depende directamente de los requerimientos físicos y mecánicos deseados para dicha aplicación y para garantizar que las propiedades sean óptimas para cualquier aplicación específica, es de gran ayuda conocer el origen del concreto del cual se obtiene el AR,

¹³ SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, Guía ambiental para el manejo de escombros en la ciudad de Bogotá [En línea]. Consultado el 17 de septiembre 2017, Disponible en: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/73753/Gu%C3%ADa+ambiental+para+el+manejo+de+escombros+en+la+ciudad.pdf>

teniendo en cuenta que los AR que provienen de concretos con altas resistencias son menos fiables que concretos con resistencias medias y bajas” (Corinaldesi, 2010). Con esta aclaración se hace preciso mencionar que la utilización de concretos hidráulicos debe ser caracterizada, con el fin de saber la procedencia de dicho material, y a su vez de acuerdo a la resistencia se puede realizar el respectivo diseño de mezcla, garantizando óptimas proporciones de manejabilidad y resistencia deseada. Dentro de los diversos estudios realizados en esta investigación se ha llegado a la conclusión de que el buen desempeño de los agregados reciclados dentro de las diferentes aplicaciones depende de factores de utilización del mismo como tipo de agregado reciclado, fracción fina o gruesa y sustitución parcial o total del agregado natural. Por lo tanto, teniendo en cuenta la aplicación deseada, es posible llegar a un diseño en donde se incluyan diferentes porcentajes de diferentes tipos de agregados y se cumpla con especificaciones técnicas especificadas para cada aplicación

- Los recursos naturales son hoy en día una fuente de protección, para una adecuada conservación, por ello es que se estipulan normas y leyes que restringen en cierto modo el mal aprovechamiento de los recursos, la mano del hombre en su invento de industria, en gran medida ha beneficiado a gran parte de la población, pero ha afectado el ecosistema en su propia sustentabilidad, contaminando y degradando fuentes hídricas, cuencas hidrográficas, medio ambiente, etc. Frente a estos cambios surge la idea de reciclar y reutilizar aquellos residuos que generados a partir de una materia prima que para muchos sería basura, la idea es utilizar los desechos que las termoeléctricas generan conocido como ceniza volante, mitigando un poco la afectación del ecosistema; frente a esta solución los ingenieros Angie Agudelo y Bryan Espinosa realizan una pertinente investigación titulada “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA”, basándose en el principio de reducir agentes contaminantes, utilizando una variada adición de ceniza volante de 10%, 20%, 25% y 30%, tal fin

para encontrar la proporción adecuada, es decir, que se ajuste a los parámetros de resistencia propuestos por un concreto convencional; todo surge a partir de su pregunta de investigación “Debido a la vulnerabilidad que presenta el medio ambiente respecto a la contaminación por la planta de Paipa (TERMOPAIPA), se ve la necesidad de mitigar la afectación ambiental empleando este residuo como reemplazo de cemento en mezclas de concreto, con el fin de reducir el impacto ambiental y darle un uso a este desecho industrial”¹⁴ encontrando que el comportamiento de la ceniza volante frente a una adición del 10% cumple con los parámetros de resistencia dados por el concreto convencional.

- Durante los últimos años se ha investigado acerca de la utilización de materiales reciclados y alternativos para la elaboración de concretos, debido a esta demanda de material tan usado en las construcciones ya sea de servicio público o privado, se evidencia que desde su proceso de producción y utilización, la característica química del material genera poluciones de alta contaminación dentro del medio ambiente, lo cual genera degradación del medio ambiental, es allí, la preocupación de mitigar dicho impacto, buscando alternativas de sustituir en cierto modo cantidades ya sea de materias primas como gravas y arenas, o en el contenido del polvo de cemento.” El aprovechamiento del concreto reciclado en la excavación es visto desde el uso de programas y normas que incentiven el uso de las tres R: reducir, reciclar y reaprovechar. De forma, que sí el material desechado en la construcción es nuevamente usado para producir uno nuevo, la excavación de materiales no renovables y el mismo impacto ambiental de la actividad disminuiría ya que no lo utilizarían con tanta frecuencia debido a que existe un

¹⁴ AGUDELO ANGIE, ESPINOSA BRYAN. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA, COLOMBIA. [en línea] Bogotá: Universidad católica de Colombia, Pregrado en ingeniería civil, 2017. [citado septiembre. 2016]. Disponible en: file:///D:/U%20La%20gran%20colombia/tesis/Documento%20Ceniza%20volante%20TERMOPAIPA.pdf

material extraído que cumpliría la misma función”¹⁵ frente a estas posturas el proceso de reciclar materiales de concreto se ha evidenciado en gran parte en suiza que es uno de los países que inicio la idea de reciclar, en Colombia es un tema nuevo respecto a otros países, las investigaciones y sus utilidades hasta ahora se están empleando para construcciones menores, es de vital importancia conocer de donde provienen los materiales y a su vez la caracterización de materiales para que sean separados y así usar la materia prima deseada, “La planta comienza su proceso con las llegadas de las volquetas con los escombros. En ese momento se llevan a la sección de clasificación ya que este material llega revueltos de asfalto, concreto, materiales de demolición, plásticos y piezas metálicas), y al mezclarse en la trituración puede causar defectos en la calidad del producto final. Esta primera limpieza se hace de forma manual por trabajadores que seleccionan en material correcto y siguen por temarlo para garantizar que no exista ninguna partícula contaminada. Al estar completa la limpieza se pone el material deseado en un sector para ser utilizado en el proceso de reciclaje”¹⁶; bajo estas tipificaciones importantes del concreto reciclado se realiza la investigación ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DEL CONCRETO RECICLADO por el ingeniero Nelson Ricardo Rozo que identifica que las “características técnicas que tiene la producción de producto reciclados de concreto. Es importante destacar, que, en esta parte del ciclo, al igual que en la extracción, los beneficios ambientales son muy grande ya que ayuda a que se disminuya la demanda de materiales naturales desde la fabricación de producto de menor costo económico y ambiental. Igualmente, beneficia la reducción del impacto ambiental generado en los desechos de construcción”¹⁷

¹⁵ SALAZAR, Alejandro. ¿Los escombros de construcción, son realmente un problema técnico? En: Biocasa Hábitat y desarrollo sostenible. [Presentación] Cali, Colombia. 2011.

¹⁶ ENTREVISTA con Carlos Vallarino, Ingeniero Industrial, supervisor de la Planta de Reciclaje de concreto de Proteja. Colombia, 11 noviembre del 2010, Planta de reciclaje de Proteja, Funza

¹⁷ ROZO, NELSON. ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DEL CONCRETO RECICLADO, COLOMBIA. [en línea] Bogotá: Universidad de los ANDES, ingeniería civil, 2012. [citado septiembre. 2016]. Disponible en:

- Durante muchos años la producción de energía ha sido indispensable para la sustentabilidad de una sociedad, donde la energía eléctrica, es un servicio y un derecho para todas las personas, al generar un beneficio hay consecuencias con dichos procesos de producción, que al transcurrir los días aumenta paulatinamente, degradando la fauna y flora de diversas cuencas hidrográficas. Las termoeléctricas utilizan como fuente primaria de producción el carbón, en el que por procesos mecánicos se obtiene energía, pero no todo el carbón es utilizado en un 100%, en el proceso de molienda el carbón genera un desecho en polvo, obtención generada en los calentadores o (pipas) de las termoeléctricas, este polvo es conocido como ceniza volante.

Se evidencia que en la caracterización mineralógica del material, posee similitud con el polvo de cemento, lo que permite adicionar en ciertos porcentajes ceniza volante, es ahí, donde las constantes investigaciones y con el avalúo de congresos de ciencia y tecnología de materiales, la revista Science direct, da a conocer que la utilización de cenizas volantes en morteros de concreto frente a las propiedades mecánicas de compresión, son las permitidas por uno convencional según las Normas ASTM D 3173, ASTM D 317, y ASTM D 3175, lo que permite establecer una sustitución de cemento por cenizas volantes, lo que permite “La eliminación de una parte del carbono no quemado en cenizas volantes es necesaria para que las mezclas que contengan una adición al 20% de cenizas volantes puedan lograr una resistencia similar a la de los morteros de cemento puro. El uso de técnicas de tamizado para eliminar las partículas no quemadas más grandes mejora las propiedades de las cenizas volantes, permitiendo la reutilización del carbono no quemado como combustible. Las mezclas de mortero con cenizas volantes añadidas adquieren mejor resistencia con un tiempo de curado más largo. La adición de hasta un 20% de cenizas volátiles a las mezclas

de cemento genera beneficios económicos y ambientales, dado que la producción de Clinker es costosa y que el almacenamiento de cenizas volantes tiene un impacto ambiental negativo en las ubicaciones cercanas a las centrales térmicas que las producen”¹⁸. Esta utilización de ceniza permite que el sector de producción eléctrico pueda mitigar en gran medida los agentes contaminantes que provocan diariamente y en el sector de la construcción reducir la cantidad de cemento, sin alterar las propiedades físico mecánicas del concreto.

¹⁸ PEDRAZA SANDRA, PINEDA YANETH, GUTIERREZ OSCAR. Influence of the unburned residues in fly ash additives on the mechanical properties of cement mortars, COLOMBIA. [en línea]Tunja: Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, 2014. [citado septiembre. 2016]. Disponible en: <file:///D:/U%20La%20gran%20colombia/tesis/1-s2.0-S2211812815002060-main.pdf>

3. JUSTIFICACIÓN

La construcción hoy en día ha tenido gran demanda debido al constante aumento poblacional y adicional al cambio y desarrollo de las ciudades; anteriormente gran parte de las viviendas tenían áreas extensas lo que conllevó a realizar construcción de apartamentos, con alturas considerables que permitan albergar la mayor cantidad de habitantes en un espacio más reducido, para tal fin se ha tenido que demoler distintas edificaciones y viviendas para dar lugar a dichas estructuras.

Los residuos o materias primas obtenidas de estas demoliciones son vistas como basuras, contaminando aún más el medio ambiente por la mala utilización y mal manejo de los materiales, al tener esta problemática surge la idea de estudiar y de reciclar dichos materiales en este caso los derivados de concretos estructurales, permitiendo una función de reemplazar un agregado natural grueso por un insumo de partículas gruesas de concreto reciclado.

Como se sabe cualquier tipo de construcción civil necesita de 4 materiales de gran importancia, como lo son; Agua, cemento, gravas y arenas etc. La obtención de estos materiales genera un desequilibrio medio ambiental debido a la explotación de canteras naturales, y por otro lado la producción de cemento, que para poder producir concreto o mortero necesita emplear el uso del agua.

Frente a estos cambios es necesario analizar el comportamiento de sustituir agregado natural por uno reciclado y poder reducir en cierto porcentaje el uso del cemento con ceniza volante, que es derivada del residuo resulta de la combustión del carbón mineral o finamente molido y que es transportado en el flujo gaseoso.

La producción de concreto en el país y en el mundo, se ha convertido en un paradigma para los protagonistas del negocio de la construcción, porque, la

producción de este material, genera alteración de los ecosistemas naturales, principalmente por la explotación indiscriminada de canteras de agregados, además se produce una degradación del ambiente. Es por esta razón que surge el interés de los ingenieros civiles de producir concreto, a partir de materiales alternativos “reciclados a partir de demoliciones”.

Por diferentes razones es evidente la necesidad de reciclar los escombros de las estructuras y demás obras civiles, que van a evitar sobre costos, y por otro lado será una buena herramienta para no generar tanta contaminación al medio ambiente, a partir de esta optimización de material se les dará más vida útil a los rellenos sanitarios y se evitará la degradación de recursos naturales no renovables; además de esto, el reciclaje adecuado de los escombros del concreto se convierte en una alternativa para emplear dichos escombros como materia prima para la fabricación de concreto nuevo. Ahora bien, es de vital importancia encontrar un concreto con buena resistencia, y como alternativa se encuentra la ceniza volante, que permite reducir la utilización de cemento y puede ser un aporte para la resistencia de la mezcla.

“Anualmente en el mundo se producen 1000 millones de toneladas de residuos de demolición, de las cuales 510 millones son producidas en Europa. En promedio solo el 8% de estos residuos se reciclan, aunque en países como Alemania, Holanda y Reino Unido cerca del 20% de agregados reciclados se reutilizan.”¹⁹

Al ver la importancia que tiene reciclar diversos materiales en otros países se hace necesario realizar con prioridad ese mismo proceso de reciclaje en el país, puesto que “en Colombia se generan alrededor de 17 millones de metros cúbicos de residuos de la construcción y demolición (RCD), que deben ser manejados en forma sanitaria y ambientalmente segura, y de los cuales sólo 3 millones

¹⁹ Blog 360 en concreto. Agregados reciclados qué y para que [En línea]. 2017 [consultado 15 de mayo de 2017]. Disponible en internet: “<http://blog.360gradosenconcreto.com/agregados-reciclados-que-y-para-que/>”

aproximadamente son llevados a plantas de aprovechamiento”²⁰. “Los residuos de construcción y demolición (RCD-escombros) son el tipo de residuo que más se genera en Colombia en peso. Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira y Armenia generan más de 100.000 toneladas/día, cuyo destino final son las escombreras o los botaderos clandestinos que se forman en las orillas de quebradas, lotes, zonas verdes o las rondas de los ríos”²¹

Esta cantidad de residuos provenientes de demoliciones de construcciones son un índice alto para el aprovechamiento de este recurso, permitiendo la producción de agregados reciclados, lo que genera una disminución en explotación de canteras naturales permitiendo un ambiente menos contraminado.

²⁰ MUHAMAD GONZÁLEZ, María Susana, Primer foro Distrital para la Gestión y Control de los Residuos de la Construcción y Demolición en el Marco del Programa Basura Cero-Escombros Cero del Plan de Desarrollo Bogotá Humana 2012-2016. [En línea]. 2012 [consultado 11 de julio de 2017]. Disponible en internet: http://www.ambientebogota.gov.co/es/c/document_library/get_file?uuid=96f078c5-3e05-4d21-8c02-7451e7caf11f&groupId=664482

²¹ Expo residuos 2015. Op.cit.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia a la compresión y a la flexión en concretos con agregado reciclado y ceniza volante.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del agregado reciclado, la ceniza volante, el cemento y los agregados naturales, de acuerdo a la Normas Técnicas Colombianas (NTC).
- Proponer el diseño de mezcla para los cilindros de concreto que contengan diferentes proporciones de agregado reciclado.
- Determinar las propiedades mecánicas de las muestras de concreto mediante el ensayo de compresión.
- Comparar la resistencia de la muestra de concreto óptima, con un concreto adicionado con ceniza volante, mediante los ensayos de compresión y flexión.

5. MARCO REFERENCIA

5.1. MARCO TEÓRICO

El concreto es el material de construcción por excelencia económico y fácil de utilizar, está compuesto por tres combinaciones de elementos fundamentales: el principal componente es el Cemento que puede llegar a ocupar entre un 7% y el 15% de la mezcla con propiedades de adherencia y cohesión que puede suministrar resistencia a la compresión, el agua como otro componente ocupa entre un 14% y 18% de la mezcla que hidrata el cemento por medio de reacciones químicas y por ultimo son los agregados ocupando un 59% o 78% de volumen de la mezcla; así mismo el concreto puede tener otro material de adicción (Escoria de alto Horno) y aditivos como (reductores de agua, súper-plastificantes, etc.) que ocupan un 1% y 7% de la mezcla.

Se puede decir que el concreto es un material durable, resistente y adherente con forma indefinida, puesto que es una mezcla maleable.²²

Las propiedades físicas, para tener en cuenta, de un agregado son varias, entre las cuales encontramos:

5.1.1. Masas Unitarias o Peso Unitario

El peso unitario es la relación existente entre una muestra de agregado y el volumen depositado de la muestra en un recipiente. Las partículas de la muestra del agregado dentro del recipiente deberán tener un acomodamiento mínimo de volumen de espacios entre ellas y esto se llegaba acabo al colocar mayor cantidad

²² SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Diseño de mezclas de concreto. III edición. Bogotá, 1996, Pág. 221”.

de partículas posibles, esto dependerá de la forma, la granulometría, el tamaño y la textura del agregado²³. El valor del se proporciona en Kg/m³ con la ecuación de peso unitario (1).

$$\text{Peso unitario} = \frac{P_s}{V_r} \quad (1).$$

Ps: Peso seco del material

Vr: Volumen del recipiente

El peso del material depende de que tan compactas y densas sean éstas. Por lo tanto, el peso unitario indica la calidad de un agregado y su capacidad para ser utilizado en la fabricación de concreto.

Existen dos tipos de pesos unitarios que se clasifica según su grado de compactación.

5.1.1.1. *Peso Unitario Apisonado.* Es el peso unitario por apisonamiento o a vibración, es someter una muestra aun apisonamiento en un recipiente eliminando espacios que pueden hacer entre gravas y así determinar los volúmenes de agregados en el diseño de mezcla por lo que las partículas del agregado van a quedar confinadas dentro de la masa.

²³ IBID., p. 97

5.1.1.2. *Peso Unitario Suelto.* Es el peso unitario cuando el material se encuentra en estado normal de reposo y el volumen que ocupa es mayor, por lo tanto, éste peso unitario es menor que el apisonado. Se determina el volumen o el volumen de agregado a transportar.

5.1.2. Granulometría

La granulometría define la distribución de partículas en una cantidad de masa del material. Esto se puede determinar por medio del análisis granulométrico, que consiste en dividir una muestra de la masa en fracciones de igual tamaño y ver qué proporción ocupa en la muestra de masa. El principio de gradación de Fuller y Thompson, Este principio trata de encontrar la mejor capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas para obtener la máxima densidad y, por consiguiente, la máxima resistencia en el concreto. Fuller y Thompson proponen que la curva de gradación ideal de cualquier masa presenta un comportamiento parabólico en su fracción fina, el cual converge con una línea recta tangente a la elipse (Grafica 1) en las siguientes fracciones con la ecuación de la elíptica de la curva de gradación (2) es la siguiente:²⁴

$$\frac{(y-b)^2}{b_2} + \frac{(x-a)^2}{a_2} = 1 \quad (2)$$

y: porcentaje de material que pasa el tamiz de abertura X

a, b: constantes que representan los ejes de la elipse (estos valores se muestran en la Tabla 2).

⁹ IBID., p. 79

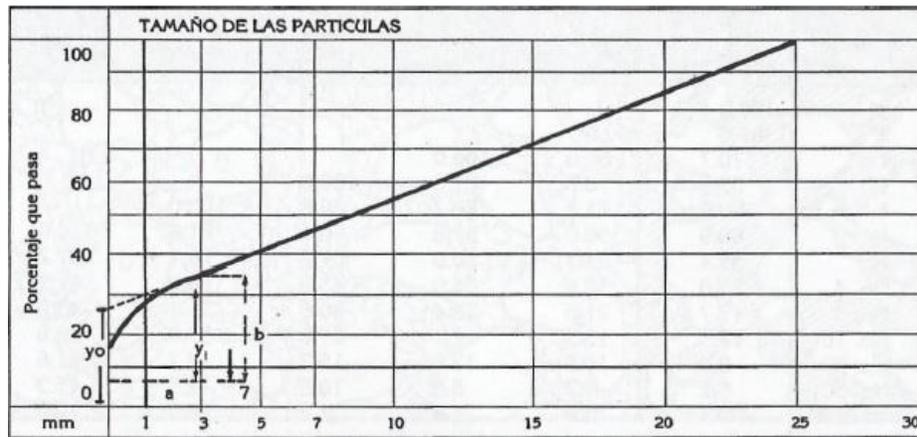
Tabla 2 Valores de las constantes que representan la parte elíptica de la ecuación

Clase de material	A	B
Agregado de canto rodado	0.164 D*	28.6
Arena natural y grava triturada	0.150 D*	30.4
Arena y grava triturada	0.147 D*	30.8

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero²⁵ 1993

D *: Tamaño máximo del agregado

Figura 1 Curva de gradación Fuller - Thompson



Fuente: Tecnología del concreto y del mortero, 1996²⁶

²⁵ IBID., p. 80

²⁶ IBID., p. 79

5.1.3. Forma

La forma de las partículas del agregado juega un papel muy importante en la fabricación del concreto. Existen diferentes formas en el agregado grueso: redondeado, irregular, angular, laminar o escamoso, entre otras²⁷. Esto se debe a que la capacidad de compactación de una mezcla no solo depende de la granulometría sino también del grado de acomodamiento de las partículas.

5.1.4. Textura

Reviste especial importancia por su influencia entre la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y flexión, cantidad requerida de agua, etc. En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar, la clasificación más utilizada está dada por la norma británica BS-812, la cual divide las superficies en términos de si es pulida, mate, suave o áspera, ligado a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca original.²⁸

5.1.5. Cemento

Es un conglomerado conformado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinada y que posteriormente son molidas, El cemento es un polvo fino que se obtiene al ponerlo en temperaturas muy altas con una mezcla de piedra caliza, arcilla y otras sustancias. tiene como propiedad principal de rápido endurecimiento, “Es un material que reacciona con el agua y que actúa como

²⁷ IBID., p. 91

²⁸ GOMEZ JURADO SARRIA, Jaime, Agregados. Instituto del concreto. Colombia; asocreto, 2000 pág. 67-97

aglutinante, presenta propiedades de adherencia y cohesión, produciendo compuestos que son muy resistentes”.²⁹

5.1.6. Clasificación del Cemento Portland

“El cemento portland es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. La clasificación de los cementos se puede hacer según diferentes criterios”³⁰. Las principales características distintivas en las que pueden basarse dichos criterios pueden ser:

- Las clases o categorías resistentes (Resistencias mecánicas mínimas o medias, usualmente la resistencia a la compresión a los 28 días).
- Los tipos de cemento (Cementos portland, cementos siderúrgicos, cementos puzolánicos, etc.).
- Las propiedades características especiales más importantes (Bajo calor de hidratación, resistencia frente medios agresivos, por ejemplo, sulfatos, rápido desarrollo de resistencias).

La clasificación más usada se encuentra en la norma ICONTEC 30, basada en las normas ASTM:

Esta norma establece la clasificación y nomenclatura de los cementos Portland de acuerdo con sus cualidades y usos.

²⁹ Argos Colombia. Cemento y concretos [En línea]. 2017 [consultado 11 de junio de 2017]. Disponible en internet: <https://www.argos.co/colombia/productos/Cemento?type=Cemento>

³⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO (ICPC). Normas Técnicas Colombianas sobre Hormigón Cemento Acero de Refuerzo y Agregados. Icontec, 1976. ICONTEC 30.

- *Cemento Portland Tipo 1:* Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- *Cemento Portland Tipo 1 M:* Es el destinado a obras de hormigón en general al que no se le exigen propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las del Tipo 1
- *Cemento Portland Tipo 2:* Es el destinado en general a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación.
- *Cemento Portland Tipo 3:* Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
- *Cemento Portland Tipo 4:* Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
- *Cemento Portland Tipo 5:* Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- *Cemento Portland Con Incorporadores de Aire:* Son aquellos a los que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
- *Cemento Portland Tipo 1-A:* Es el cemento Portland Tipo 1, al cual se le adiciona un material incorporado de aire.
- *Cemento Portland Tipo 1-M – A:* Es el cemento Portland 1-M, al cual se le adiciona un material incorporado de aire.
- *Cemento Portland Tipo 2-A:* Es el cemento Portland Tipo 2, de moderado calor de hidratación al que se le adiciona un material incorporado de aire.

- *Cemento Portland Tipo 3-A*: Es el cemento Portland Tipo 3, de alta resistencia inicial, al cual se le agrega un material incorporado de aire³¹

5.1.7. Pasta de Cemento

Es una estructura rígida formada por productos sólidos, originados durante la reacción del cemento anhidro y el agua. sus elementos fundamentales son:

- *El gel*: nombre con el que se denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento.
- *Los poros*: son los espacios vacíos que se forman dentro de la masa del concreto.
- *El cemento hidratado*: es la combinación del cemento con el agua.
- *Los cristales*: son elementos cuya presencia se denota en todo concreto, formado por cristales de hidróxido, calcio. Estos cuatro elementos tienen un papel fundamental en el comportamiento del concreto “la pasta de cemento tiene como finalidad separar las partículas del agregado, Llenar los vacíos entre las partículas de agregado y adherirse fuertemente a ellas y Proporcionar lubricación a la masa cuando ésta aún no ha endurecido”.³²

³¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO (ICPC). Normas Técnicas Colombianas sobre Hormigón Cemento Acero de Refuerzo y Agregados. Icontec, 1976. ICONTEC 30.

³² Scribd. Tecnología del concreto Universidad cesar vallejo [En línea].2017 Consultado 12 de junio de 2017, Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/52452347/Pasta-de-Cemento>

5.1.8. Agregados Pétreos

Partículas minerales granulares que usan para bases, sub- bases y relleno de carreteras, los agregados también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para bases, sub-bases, superficies de desgaste y estructuras de drenaje. Las fuentes de agregados incluyen los depósitos naturales de arena y grava, los pavimentos pulverizados de concreto y asfalto, el material pétreo resquebrajado y la escoria de altos hornos.

5.1.9. Agregados Reciclado

En la industria de la construcción los retos técnicos son permanentes. Por esto en la actualidad se hace necesario buscar la transformación de operaciones, entre ellas encontrar una materia prima que haga de la construcción una industria amigable ambientalmente generando el menor impacto ambiental posible. En esa línea, se ha encontrado que los agregados reciclados brindan una alternativa a la construcción de nuevas estructuras con la utilización de material de estructuras demolidas

“El agregado de concreto reciclado (ACR) no es otra cosa que la utilización como agregado de un concreto que ha sido previamente usado en otra obra que fue demolida y en la industria no serían más que escombros. Este material se utiliza como base o sub-base para construir nuevas carreteras o para rehabilitar estructuras existentes, entre otras aplicaciones. El concreto reciclado se caracteriza básicamente por contar con agregados de concreto reciclado, el cual se mezcla con cemento, agregado natural (grava y arena), agua y aditivos para obtener un concreto de características físicas y mecánicas similares a las del concreto tradicional.”³³

³³ Blog 360 en concreto. Agregados reciclados qué y para que [En línea]. 2017 [consultado 15 de mayo de 2017]. Disponible en internet: “<http://blog.360gradosenconcreto.com/agregados-reciclados-que-y-para-que/>”

La obtención de agregados de concreto reciclado se da como fruto de la trituración del concreto proveniente de la demolición de estructuras o del concreto sobrante de algunos procesos en que muchas veces se solidifica y se dispone como escombros. Su clasificación se hace según los parámetros dados para el agregado natural:

- *Fino*: Pasa tamiz No. 4 pero retenido hasta en el tamiz No. 200
- *Grueso*: Retenido en el tamiz No. 4 o superior.

5.1.10. Peso específico o densidad

El peso específico, o densidad, está definido como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada. Las partículas que componen ésta masa contienen cavidades o poros que pueden encontrarse vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua. Dependiendo del estado en que se encuentren los poros se puede calcular diferentes pesos específicos.

5.1.10.1. *Peso específico nominal*. También denominado densidad nominal, es la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros no saturables. Se utilizará la ecuación de peso específico nominal (3)³⁴.

$$\text{peso específico nominal} = \frac{ps}{Vm - Vps} \quad (3)$$

Ps: peso seco de la masa kg

Vm: volumen ocupado por la masa m³

³⁴ SANCHEZ DE GUZMAN. Op.cit, p. 96.

V_{ps} : volumen de los poros saturables m^3

5.1.10.2. *Peso específico aparente.* También denominado densidad aparente, es la relación que hay entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas. Éste volumen incluye todos los poros, los saturados y no saturados. Para obtener el valor del peso específico aparente se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{P_s}{V_m}$$

Dónde:

P_s : Peso seco de la masa kg

V_m : Volumen Ocupado por la masa m^3

5.1.11. **Propiedades del Concreto Endurecido**

El concreto presenta características favorables en el estado endurecido que le permiten ser un material de uso importante y diario en la construcción, lo más importante que presenta a cuantas propiedades este material es la durabilidad. Las estructuras deben ser proyectadas para que su vida útil sea larga, lo cual se le contribuye a tener en cuenta y proyectar las etapas de colocación, compactación, y curado. Los reglamentos de construcción de estructuras de concreto especifican relaciones a/c máximas, contenido y tipo de cemento, uso de aditivos, características de los agregados.

5.1.12. Capacidad de absorción

La capacidad de absorción, es someter una muestra de material a una saturación durante 24 horas, cuando ésta termina se procede a secar superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra obtener el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material. Estos estados dependen del grado de absorción de las partículas, y se puede calcular con la ecuación de diferencia de pesos (4).

$$\% \text{ Absorción} = \frac{P_{SSS} - P_S}{P_S} \quad (4)$$

PSSS: peso de la muestra saturada superficialmente seca Kg

PS: peso seco de la muestra Kg.

5.1.13. Agua

El agua es un componente esencial en las mezclas de concreto y mortero, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, para cada cuantía del cemento existe una cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento. “el resto del agua solo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y se pueda obtener la manejabilidad adecuada de las mezclas frescas”³⁵ El agua adicional es una masa que queda dentro de la mezcla y cuando se fragua el concreto va a crear porosidad, lo que reduce la resistencia, razón por la que cuando se requiera una mezcla bastante fluida no debe lograrse su fluidez con agua, sino agregando aditivos plastificantes. El agua utilizada en la elaboración del concreto y mortero debe ser apta para el

³⁵ Concreto. El Agua Del concreto [En línea]. 2017 [consultado 15 de mayo de 2017]. Disponible en internet: “<http://elconcreto.blogspot.com.co/2009/01/el-agua-del-concreto.html>”

consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas. En caso de tener que usar en la dosificación del concreto, agua no potable o de calidad no comprobada, debe hacerse con ella cubos de mortero, que deben tener a los 7 y 28 días un 90% de la resistencia de los morteros que se preparen con agua potable.

“El agua del curado tiene por objeto mantener el concreto saturado para que se logre la casi total hidratación del cemento, permitiendo el incremento de la resistencia”³⁶.

5.1.14. Resistencia

La resistencia más importante del concreto es su resistencia a la compresión, puesto que el concreto trabaja muy mal a flexión. La resistencia a la compresión se puede definir como la resistencia máxima medida en un cilindro de concreto sometido a carga axial. Para determinar éstas resistencias se deben realizar pruebas en especímenes de concreto a los 7, 14 y 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad.

La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura (M.R.) para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1,99 a 2,65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión medida en kg/cm². Aunque la resistencia a la tensión (módulo de rotura) del concreto es de poca importancia y se puede relacionar con la resistencia a compresión con la ecuación de módulo de rotura (5).

$$M.R. = k\sqrt{f'c} \quad (5)$$

³⁶ EL AGUA DEL CONCRETO. Op.cit., “<http://elconcreto.blogspot.com.co/2009/01/el-agua-del-concreto.html>”

M.R: módulo de rotura.

k: coeficiente de correlación.

f'c: esfuerzo a compresión.

El valor del módulo de rotura del concreto es aproximadamente de 10% a 20% de su resistencia a compresión³⁷, y el coeficiente k es específico para cada tipo de concreto y debe ser determinado de forma experimental.

5.1.15. Diseño de mezcla método grafico

El diseño de mezcla con el método gráfico, es utilizado cuando los agregados gruesos y finos están mal gradados, por eso mediante este método se debe hacer uso de especificaciones que cubran todo el agregado del concreto, desde las partículas más finas de la arena hasta las partículas más grandes del agregado grueso. Se debe encontrar una proporción adecuada entre arena y agregado grueso.

Permite encontrar el porcentaje óptimo de agregados, esto fue propuesto por Fuller y Thomson en el año 1907. Donde el contenido de vacíos es mínimo, y consiste en combinar los agregados de tal forma que la granulometría cumpla o sea cercanamente posible a la curva ideal”

Lo que interesa es obtener una granulometría tal que la manejabilidad de la mezcla sea adecuada con la menor cantidad de pasta posible.

Una carencia de agregados finos conducirá a mezclas ásperas, segregables y difíciles de trabajar, en tanto que un exceso de finos exigirá un alto contenido de pasta de cemento, dando origen a problemas de retracción, y obviamente a mezclas más costosas e incluso de resistencias menores.

³⁷ IBID., p. 242.

Tabla 3 Límites de gradación recomendados para granulometrías continuas en porcentaje que pasa para distintos tamaños máximo agregado

Tamiz		Porcentaje que pasa el tamaño máximo indicado en mm (pulg)						
mm	pulg	76,1 mm (3")	50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2)	25,4 mm (1")	19,1 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	9,51 mm (3/8")
76,1	3	100						
50,8	2	80-87	100					
38,1	1 1/2	68-79	85-90	100				
25,4	1	55-68	68-78	80-87	100			
19,1	3/4	47-62	58-71	68-79	85-90	100		
12,7	1/2	37-53	46-61	55-68	68-78	80-87	100	
9,51	3/8	32-48	40-56	47-62	58-71	68-79	85-90	100
4,76	4	22-38	27-44	32-48	40-56	47-62	58-71	68-79
2,38	8	15-30	19-34	22-38	27-44	32-48	40-56	47-62
1,19	16	10-23	13-27	15-30	19-34	22-38	27-44	32-48
0,595	30	7-18	9-21	10-23	13-27	15-30	19-34	22-38
0,297	50	5-14	6-16	7-18	9-21	10-23	13-27	15-30
0,149	100	3-11	4-13	5-14	6-16	7-18	9-21	10-23

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero³⁸

Para calcular la proporción de los agregados en la mezcla es el método gráfico, el cual provee las cantidades de cada tamaño de partícula de agregado grueso y fino, referido a una curva de gradación recomendada.

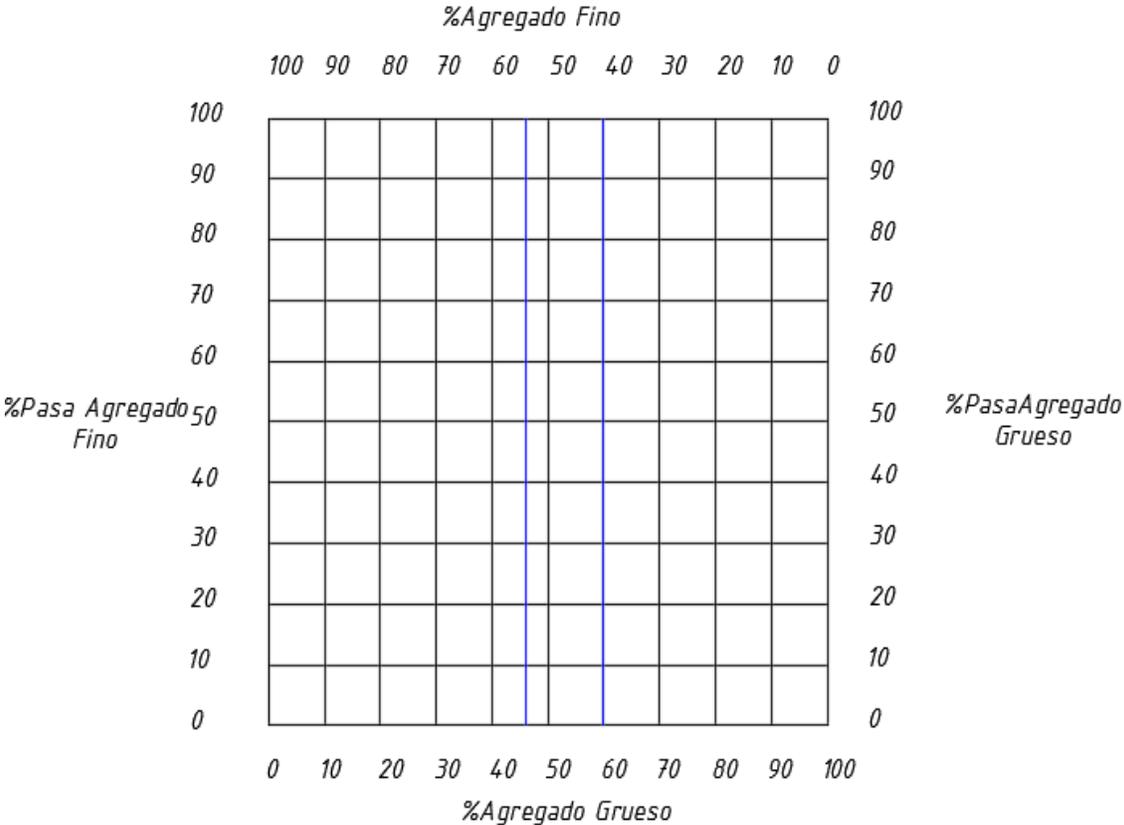
1. Se dibuja una cuadrícula 10X10
2. A lo largo de las ordenadas y en orden ascendente se numeran porcentajes iguales de 0 a 100
3. En la abscisa superior se numeran porcentajes iguales, de 100 a 0 y de derecha a izquierda. Allí se leerá el porcentaje de agregado fino referido al agregado total
4. En las ordenadas del lado izquierdo se marcan los porcentajes que pasan correspondientes al agregado fino, anotando el número o abertura del tamiz correspondiente.
5. En las ordenadas del lado derecho se repite lo mismo con el agregado grueso
6. En el eje inferior de las abscisas se leerá entonces, el porcentaje del agregado grueso referido al agregado total.

³⁸ IBID., p. 244

7. Los puntos correspondientes a tamices de igual número de abertura en las dos granulometrías se unen entre sí por una línea recta. Estas líneas representan los porcentajes posibles de la mezcla de agregados que pueden pasar por cada uno de los tamices. El cuadro así elaborado permite calcular gráficamente la granulometría para cualquier mezcla de un agregado fino y un agregado grueso.

Sobre las líneas trazadas, se marcará los límites porcentuales (máximo y mínimo).

Figura 2 Método Grafico



Fuente: Autores, 2017

5.1.16. Ceniza Volante

“La norma ASTM-C-618-03 define el término ceniza volante como: “El residuo finamente dividido que resulta de la combustión del carbón mineral o finamente molido y que es transportado en el flujo gaseoso”. “Esta definición no incluye, entre otras cosas, los residuos resultantes de: (1) la quema de basura municipal o algún otro tipo de basura con carbón; (2) la inyección de cal directamente dentro del calentador para remover azufre; o (3) la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente llamados “incineradores de ceniza”. Se puede definir la ceniza volante como un subproducto de la combustión del carbón en las centrales termoeléctricas para la producción de energía eléctrica.”³⁹

Son cuatro los tipos de carbón que se utilizan en las centrales termoeléctricas: antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito, en los que varía principalmente el poder calorífico y la cantidad de carbón fijo presente. El tipo de carbón utilizado influenciará en el tipo de ceniza volante que se obtenga. Debido a la mejora de la eficiencia del quemado, el carbón es triturado en partículas más finas, con un 75% que pasan la malla #200 (75 µm).

“Los componentes orgánicos son oxidados y volatilizados durante la combustión y las partículas de cenizas se funden en la zona de combustión del horno, sin embargo, una vez que dejan esta zona se enfrían muy rápido, pudiendo pasar de 1500 °C a 200 °C en unos pocos segundos, y solidifican como partículas esféricas vidriosas. Alguna de esta materia fundida se aglomera y debido a su tamaño no puede ser arrastrada por el flujo gaseoso y cae depositada en el fondo de la cámara de combustión formando la escoria. Pero la mayoría es arrastrada por el flujo gaseoso y es llamada ceniza volante. Para retener las cenizas volantes del

³⁹ VASQUES PANIAGUA, ERIC. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE [en línea] México: Universidad nacional Autónoma de México, Maestría en ingeniería, 2007. [citado junio. 2016]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1705/vasquezpaniagua.pdf?sequence=1>

flujo de gases que sale de la cámara de combustión y evitar que sean emitidas a la atmósfera se emplean diversos sistemas de retención: filtros de tejidos especiales, colectores mecánicos (ciclones), depuradores por vía húmeda y precipitadores electrostáticos. Las cenizas volantes se recogen en las tolvas de los precipitadores electrostáticos, desde donde son transportadas a lugares de almacenamiento, situadas frecuentemente en balsas de decantación o en seco.”⁴⁰

La norma ASTM-C-618-03 divide en tres los tipos de ceniza volante:

- **Clase N:** Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o, calcinadas o sin calcinar; y materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.
- **Clase F:** Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.
- **Clase C:** Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón sub bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante además de tener propiedades puzolánicas tiene propiedades cementarías.

5.1.17. Composición química de la ceniza volante

la composición química por sí misma no es tan importante como las diferencias en la composición mineralógica y la granulometría (tamaño y forma de la partícula) para determinar la influencia de la ceniza volante en las propiedades del concreto. La norma ASTM-C-618-03 dice que la composición química debe estar acorde con los requerimientos de la tabla 4.

⁴⁰ IBID., p. 6

Tabla 4 Requerimientos químicos de la ceniza volante

	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) + óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) + óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min %	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO ₃), max %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, max %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por calcinación, max %	10.0	6.0	6.0

Fuente: CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE⁴¹

5.1.18. Características de las partículas de ceniza volante

El mecanismo por el cual las cenizas volantes influyen en las propiedades del concreto fresco y endurecido, depende más del tamaño, forma y textura de las partículas que de la composición química. La demanda de agua y trabajabilidad están controladas por la distribución del tamaño de partículas, por el efecto de empaquetamiento de las partículas y la suavidad de la superficie. Las propiedades puzolánicas y cementarías, que gobiernan el desarrollo de esfuerzos y permeabilidad de las mezclas, están controladas ambas por las características mineralógicas y el tamaño de partícula de la ceniza volante. Las partículas de ceniza volante son de forma esférica, y eso tiene un efecto positivo en el requerimiento de agua y la trabajabilidad de las mezclas de concreto, algunas de las partículas esféricas de la ceniza volante son huecas y completamente vacías (llamadas cenoesferas).

⁴¹ IBID., p. 7

- **Color.** La ceniza volante posee un color gris, pero su color varía de gris claro, es decir altos contenidos de cal, su color negro indica altos contenidos de carbón. Por ello, es importante, controlar la tendencia de estos, ya que no le darían un aspecto favorable al concreto.⁴²
- **Propiedad puzolánica:** Esta propiedad es la característica principal con la que se mezcla la sílice de la ceniza con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento⁴³
- **Forma de la partícula:** La ceniza volante es un polvo granulado de características únicas, comúnmente con forma esférica en la mayoría de sus partículas. Sin embargo, en la fracción más gruesa de 300 a 45 micras, la mayoría de las partículas son negras y porosas. En general, este material grueso y arenoso tiene un valor de pérdida por ignición de 3 a 10 veces mayor que el de la fracción que pasa la malla de 45 micras, lo que indica la presencia de carbón quemado parcialmente⁴⁴
- **Ceniza en el concreto:** La ceniza volante en el concreto garantiza muchos beneficios. Se pueden resaltar las propiedades del concreto fresco a través de la disminución de agua para el revenimiento presentado, con mejor manejabilidad, una cohesión mejorada, una segregación reducida.

Se reduce la temperatura pico durante el proceso de curado, lo que implica una disminución de agrietamientos térmicos. Para el concreto endurecido, tener ceniza

⁴² AGUDELO ANGIE, ESPINOSA BRYAN. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA, COLOMBIA. [en línea] Bogotá: Universidad católica de Colombia, Pregrado en ingeniería civil, 2017. [citado septiembre. 2016]. Disponible en: file:///D:/U%20La%20gran%20colombia/tesis/Documento%20Ceniza%20volante%20TERMOAIPA.pdf

⁴³ IBID., p. 37

⁴⁴ IBID., p. 37

volante dentro de su composición puede mejorar la durabilidad, se reduce la permeabilidad y genera una ganancia a largo plazo para el concreto⁴⁵

- **Trabajabilidad:** Cuando la ceniza volante tiene una finura mayor, se produce un efecto de reducción en el agua, y puesto que un aumento en la proporción de ceniza en el cemento reduce aún más la demanda de finos y al menor porcentaje de agua, se adquiere una mayor densidad en la mezcla. La ceniza volante tiene la capacidad de alterar las propiedades del concreto fresco al reducir el porcentaje de agua. El concreto que contiene ceniza volante es engañoso, ya que al aumentar el porcentaje de ceniza en la mezcla hace que sea más difícil la manipulación y el porcentaje de agua disminuye notoriamente⁴⁶

5.2. MARCO CONCEPTUAL

Esta investigación, consiste en determinar la importancia de reciclar el concreto, desechado por la demolición de obras civiles en la ciudad de Bogotá, para la producción de concreto estructural nuevo. Por lo anterior se hace necesario definir los conceptos fundamentales que se encuentran dentro del título del proyecto de investigación.

Para empezar, hay que definir la palabra concreto u hormigón que según Holcim, empresa productora de cemento, mortero y concreto, “El concreto es una mezcla de cemento, agua, arena y grava que se endurece o fragua espontáneamente en contacto con el aire o por transformación química interna hasta lograr consistencia pétreo.

⁴⁵ IBID., p. 38

⁴⁶ IBID., p. 38

Por su durabilidad, resistencia a la compresión e impermeabilidad se emplea para levantar edificaciones y pegar o revestir superficies y protegerlas de la acción de sustancias químicas”.⁴⁷

Por la definición anterior, se vuelve de vital importancia identificar el componente que se va a reemplazar en la mezcla de concreto por el hormigón reciclado, llegando a deducir que, por su mayor porcentaje de influencia, el componente a reemplazar sería la grava.

Posteriormente, respecto al concepto de reciclaje, se entiende por reciclaje a la “obtención de una nueva materia prima o producto, mediante un proceso fisicoquímico o mecánico, a partir de productos y materiales ya en desuso o utilizados. De esta forma, se consigue alargar el ciclo de vida de un producto, ahorrando materiales y beneficiando al medio ambiente al generar menos residuos. El reciclaje surge no sólo para eliminar residuos, sino para hacer frente al agotamiento de los recursos del planeta”.⁴⁸

Por lo anterior, se puede deducir que el concreto reciclado, es materia prima en desuso que se pretende utilizar para la obtención de nuevo concreto estructural, reemplazando componentes como la grava que son producidos gracias a la explotación de canteras. Así que, con esta actividad del reciclaje de concreto, se está mitigando en alguna forma la degradación de la naturaleza.

⁴⁷ Holcim Colombia. Concretos y morteros [En línea]. 2016 [consultado 11 de mayo de 2016]. Disponible en internet: “<http://www.holcim.com.co/productos-y-servicios/concretos-y-morteros.html>”

⁴⁸ INFORECICLAJE. Qué es el reciclaje, Definición de reciclaje. [En línea]. 2016 [consulta 11 de mayo de 2016]. Disponible en internet: “<http://www.inforeciclaje.com/que-es-reciclaje.php>”

5.3. MARCO LEGAL

Para este proyecto de investigación, se tendrán en cuenta fundamentalmente la norma técnica colombiana (NTC) que además de otras actividades, controlan y reglamentan los ensayos de laboratorio que se creen pertinentes para la producción de concreto estructural, además que mencionan cada uno de los procedimientos a seguir en estos ensayos de laboratorio.

A continuación, en la tabla 5 se mencionarán algunos de los ensayos de laboratorio que se deben hacer a cada uno de los componentes del concreto y las normas en donde se encuentran especificados estos ensayos.

Tabla 5 Marco Legal

NORMA	TÍTULO	OBJETO
NTC 30	Cemento Portland. Clasificación y nomenclatura	Esta norma abarca la clasificación y nomenclatura de los cementos portland de acuerdo con sus cualidades y usos.
NTC 32	Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo	Esta norma cubre los requisitos para el diseño y construcción de tamices de ensayo empleando un medio de tela de alambre tejida montada en un marco para uso en ensayos para la clasificación de materiales de acuerdo con el tamaño de partículas designado.
NTC 77	Concretos. Método de ensayos para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.	Esta norma abarca la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado.

NORMA	TÍTULO	OBJETO
NTC 78	Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75mm en agregados.	Esta norma establece el procedimiento para determinar por lavado, la cantidad de material más fino que el tamiz mm (N° 200) en agregados. Las partículas de arcilla y otras partículas del agregado que se dispersan por el lavado con agua, así como los materiales solubles en agua, se separan del agregado durante el ensayo.
NTC 92	Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados	Esta norma determina a masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos, gruesos o mezclados. Esta norma se aplica a agregados que no exceden los 150mm de tamaño máximo nominal.
NTC 110	Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.
NTC 118	Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato Vicat.
NTC 121	Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas	Esta norma establece los requisitos físicos y mecánicos que deben cumplir los siguientes tipos de cementos portland 1,1M,2,3,4 y 5
NTC 129	Práctica para la toma de muestras de agregados	Esta norma abarca la toma de muestras de agregados finos y gruesos.
NTC 174	Concreto. Especificaciones de los	Esta norma establece los requisitos de

NORMA	TÍTULO	OBJETO
	agregados para concreto.	gradación y calidad para los agregados finos y gruesos, (excepto los agregados livianos y pesados) para uso en concretos.
NTC176	Método de ensayos para determinar la Densidad y la Absorción del agregado grueso	Este método de ensayo tiene por objeto determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. La densidad se puede expresar como densidad aparente, densidad aparente(SSS) (saturada y superficialmente seca), o densidad nominal. La densidad nominal (SSS) y la absorción se basan en el humedecimiento en agua del agregado después de 24h. este método de ensayo no está previsto para ser usado con agregados livianos.
NTC 221	Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto.
NTC 226	Método de ensayo para determinar la Finura del cemento hidráulico por medio de los tamices de 75mm (N°200) y de 150mm(N°100)	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices de 75mm (N°200) y de 150mm(N°100).
NTC 237	Método para determinar la densidad y la Absorción del agregado fino.	Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad aparente y nominal, a una condición de temperatura de 23°C +/- 2°C y la absorción del agregado fino.
NTC 396	Método de ensayo para determinar el	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento

NORMA	TÍTULO	OBJETO
	asentamiento del concreto.	del concreto en la obra y en el laboratorio.
NTC 673	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.	Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilindros de concreto, tales como los cilindros moldeados y los núcleos extraídos. Esta limitado a concretos con masa unitaria que excedan los 800 kg/m ³
NTC 1522	Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.	Esta norma establece el procedimiento que debe seguirse en las operaciones de tamizados de suelos, con el fin de determinar su composición granulométrica.
NTC 1776	Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado sometido a secado.
NTC 3318	Concreto. Producción de concreto.	Esta norma establece las especificaciones para concreto producido en planta, ya sea dentro o fuera de las instalaciones del proyecto, y concreto producido en obra. Esta norma no contempla la colocación, compactación, curado o protección del concreto después de entregado al cliente.
NTC 3493	Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland.	Utilización de cenizas volantes o puzolanas naturales, calcinadas o crudas como aditivos minerales para concreto, donde sea deseable la acción cementante o puzolánica, o ambas, o donde puedan considerarse apropiadas

NORMA	TÍTULO	OBJETO
		otras propiedades normalmente atribuidas a aditivos minerales finos.
NTC 3674	Practica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos.	Esta norma describe tres métodos para la reducción de las muestras de campo de los agregados, al tamaño apropiado para ensayarlas utilizando técnicas que tienen por objeto minimizar las variaciones, en las características medidas, entre las muestras de ensayo procesadas de esta manera y la muestra de campo.

Fuente: autores, 2016

5.1.19. Propiedades mecánicas del concreto

Mediante análisis empíricos, y constantes ensayos de laboratorio, se obtiene la caracterización de las propiedades físicas, las cuales permitirán establecer valores específicos en las propiedades mecánicas.

- **Resistencia a la compresión:** “Es un ensayo el cual consiste en aplicar una carga axial de compresión a un cilindro, a una velocidad de carga constante, hasta que éste presente una falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo entre la sección transversal del cilindro”⁴⁹, además la resistencia del concreto se identifica con la resistencia a la compresión, debido a que es la propiedad mecánica más sencilla, esta representa la condición de carga en la que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos, de modo que la mayoría de elementos estructurales se diseñan con el fin de obtener el mayor provecho de esta propiedad, “En términos generales, la resistencia mecánica, que potencialmente puede desarrollar el concreto, depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, así como, de la adherencia que se produce en ambos materiales. En la práctica, habría que añadir a estos factores el grado de densificación logrado en la mezcla ya que, como ocurre con otros materiales, la proporción de vacíos en el concreto endurecido tiene un efecto decisivo en su resistencia.

⁴⁹VANEGAS JULIANA, ROBLES JUAN PABLO. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO RECICLADO PARA SU USO EN EDIFICACIONES CONVENCIONALES. [en línea] Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Pregrado en ingeniería civil, 2008. [citado septiembre. 2016]. Disponible en: file:///C:/Users/user/Downloads/tesis428.pdf

La adquisición de la resistencia mecánica de la pasta de cemento conforme endurece es una consecuencia inmediata del proceso de hidratación del cemento.”⁵⁰

- **Resistencia a la tracción:** La resistencia a la tracción es mucho menor que su resistencia a la compresión, constituyendo aproximadamente entre un 8% y 15%, depende además de la resistencia propia de la pasta de cemento y agregados, además de la adherencia que se genera de ambos, la influencia relativa de estos factores puede variar en función de los procedimientos que se utilizan para determinar la resistencia del concreto a tensión, que son básicamente.

- **Prueba de tensión directa:** Por medio de cilindros sometidos a una fuerza de tensión axial

- **Prueba de tensión indirecta:** están determinados por medio de cilindros sujetos a una carga de tensión diametral

- **Prueba de tensión por flexión en especímenes prismáticos:** Pueden ser ensayados opcionalmente con una carga en el centro, o con dos cargas concentradas iguales aplicadas en los dos tercios de la luz de la viga.

- **Resistencia a la flexión:** La resistencia a la flexión del concreto es una medida de la resistencia a la tracción del concreto (hormigón). Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas (150 x 150 mm) de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) en libras por pulgada cuadrada (MPa) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

⁵⁰ RODRIGUEZ JHON, Tecnología del concreto. Blog spot [en línea], 2 de julio de 2016 [Consultado 20 septiembre 2017]. Disponible en internet: <http://www.normasicontec.org/referencias-electronicas-normas-icontec/>

El Módulo de Rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. El Módulo de Rotura determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto como en un 15%.⁵¹

Se realiza un ensayo que consiste en determinar la resistencia a la flexión del concreto por medio del uso de una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de su luz.

¿Por qué es útil el ensayo de resistencia a flexión?

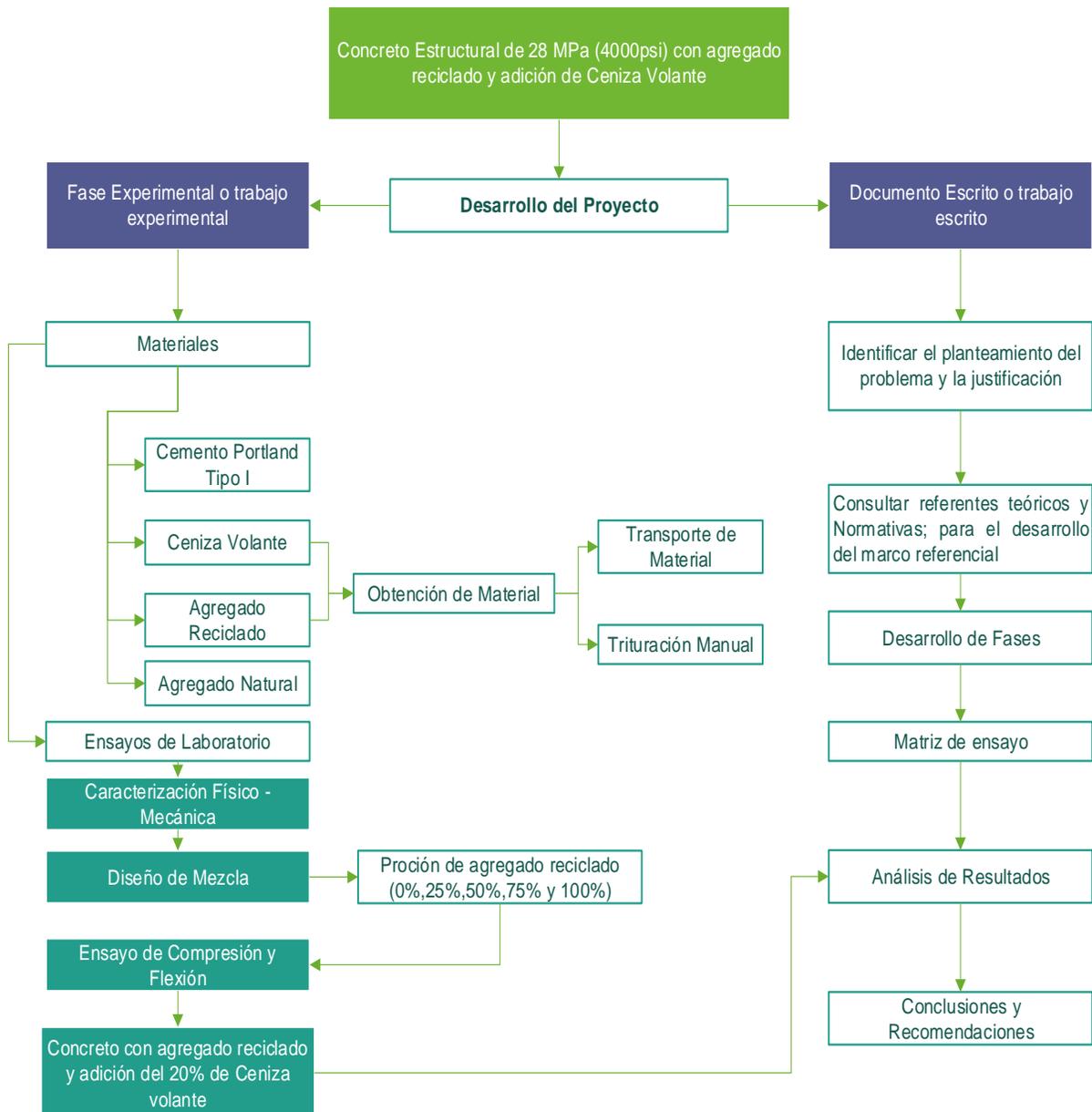
Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, puede ser requerido el diseño de la mezcla en el laboratorio, basado en los ensayos de resistencia a la flexión, o puede ser seleccionado un contenido de material cementante, basado en una experiencia pasada para obtener el Módulo de Rotura de diseño. Se utiliza también el Módulo de Rotura para el control de campo y de aceptación de los pavimentos. Se utiliza muy poco el ensayo a flexión para el concreto estructural. Las Agencias y empresas que no utilizan la resistencia a la flexión para el control de campo, generalmente hallaron conveniente y confiable el uso de la resistencia a compresión para juzgarla calidad del concreto entregado.

⁵¹ Civil geeks. Resistencia a la flexión en concretos [En línea]. Febrero 2013 [consultado 20 de septiembre de 2017]. Disponible en internet: <https://civilgeeks.com/2011/03/18/resistencia-a-la-flexion-del-concreto/>

6. DISEÑO METODOLÓGICO

En la figura 3 se plasma el diagrama de procesos de la investigación a desarrollar

Figura 3 Diagrama de Procesos



Fuente: autores, 2017

6.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que los datos que se tomaron, se pudieron medir y contar. Además, se recurrió al uso de gráficas para la organización de los datos y lo que se pretendió fue comprobar una hipótesis o teoría que en este caso es la resistencia a la compresión del concreto.

6.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de tipo experimental, debido a que, mediante el planteamiento de una hipótesis, se pretendió predecir el comportamiento mecánico que tendría el concreto con el reemplazo de agregado natural por agregado reciclado y/o la adición de ceniza volante, posteriormente, con los ensayos de laboratorio es decir la verificación experimental, se comprueba la validez de la hipótesis inicial.

6.4. HIPÓTESIS

El concreto con agregado reciclado, presenta una disminución en su resistencia a la compresión, conforme se aumenta el porcentaje de reemplazo del agregado, esto debido a la posible absorción por parte del mortero adherido a las partículas de agregado.

Por otro lado, se espera que se reduzca la demanda de agua, debido a la adición de ceniza volante.

6.5. MUESTRA

6.5.1. MUESTRA. En esta investigación se escogió un muestreo por conveniencia porque el material que se está utilizando tiene una diversidad de tamaños, de orígenes y de usos anteriores a su reciclaje, por lo que se selecciona la muestra teniendo en cuenta la necesidad de la investigación, por lo tanto, se discrimina el material por tamaños y por origen para obtener una muestra representativa para el desarrollo de la investigación.

6.6. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

En la siguiente tabla 6 se definen las variables dependientes, independientes e intervinientes que se tuvieron en cuenta en la investigación.

Tabla 6 Definición y Operación de Variables

	Variable	Indicador	Descripción	Medición
Independientes	Agregado reciclado	Cantidad de agregado reciclado	Porcentaje de reemplazo de agregado reciclado con respecto al porcentaje total de agregado natural.	% en peso % en volumen
		Tamaño máximo del agregado	Se escoge según la trabajabilidad deseada para el diseño de mezcla y según el tamaño de las probetas que se van a usar.	mm
	Ceniza volante	Cantidad de ceniza volante	Se toma la cantidad de ceniza con respecto al porcentaje total de cemento.	% en peso % en volumen
Dependientes	Comportamiento mecánico del concreto	Resistencia a la compresión		PSI, MPa
		Resistencia a la flexión		MPa
Intervinient	Curado del concreto	Tiempo de curado del concreto		7, 14 y 28, días
	Granulometría	Tamaño y forma del agregado		mm

Fuente: Autores, 2016

6.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la recolección de información se utilizaron formatos y fichas técnicas del laboratorio de materiales, donde se tienen en cuenta las variables para cada caso (peso unitario de agregados, granulometría).

Por otro lado, para los ensayos en los que no se tienen formatos, se toman datos por medio de la observación del comportamiento de las variables intervinientes.

6.8. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

6.8.1. Fase 1.

Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, la ceniza volante, el cemento y los agregados naturales, de acuerdo a la norma técnica colombiana NTC.

- *Actividad 1.1.* Ensayos de laboratorio para determinar las propiedades del cemento o material cementante y ceniza volante (peso específico y finura).
- *Actividad 1.2.* Realizar ensayos para determinar las propiedades de la pasta de cemento (consistencia normal y tiempos de fraguado).
- *Actividad 1.3.* Realizar la trituración del agregado reciclado.
- *Actividad 1.4.* Realizar ensayos para determinar las propiedades de los agregados, tanto naturales como reciclados (masas unitarias, peso unitario, %absorción y granulometría).

- *Actividad 1.5.* Realizar cubos de mortero para determinar su resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 y 28 días.

6.8.2. Fase 2

Propuesta del diseño de mezcla para cilindros de concreto que contengan agregado reciclado.

- *Actividad 2.1.* Proponer el diseño de mezcla para las diferentes proporciones de agregado reciclado (0%, 25%, 50%, 75% y 100%).
- *Actividad 2.2.* Realizar la mezcla de concreto y la fundición de los cilindros para las diferentes proporciones de agregado.
- *Actividad 2.3.* Sumergir los cilindros en pileta de agua, para el curado de las muestras.

6.8.3. Fase 3

Resistencia a la compresión de un concreto con agregado natural, con una proporción de agregado reciclado.

- *Actividad 3.1.* Realizar los ensayos de compresión para cilindros de concreto a los siete días de curado en agua.
- *Actividad 3.2.* Realizar los ensayos de compresión para cilindros de concreto a los 14 días de curado en agua.

- *Actividad 3.3.* Realizar los ensayos de compresión para cilindros de concreto a los 28 días de curado en agua.
- *Actividad 3.4.* Comparar los resultados de los cilindros de concreto sin agregado reciclado, con los que sí tienen y determinar un porcentaje de sustitución óptimo.

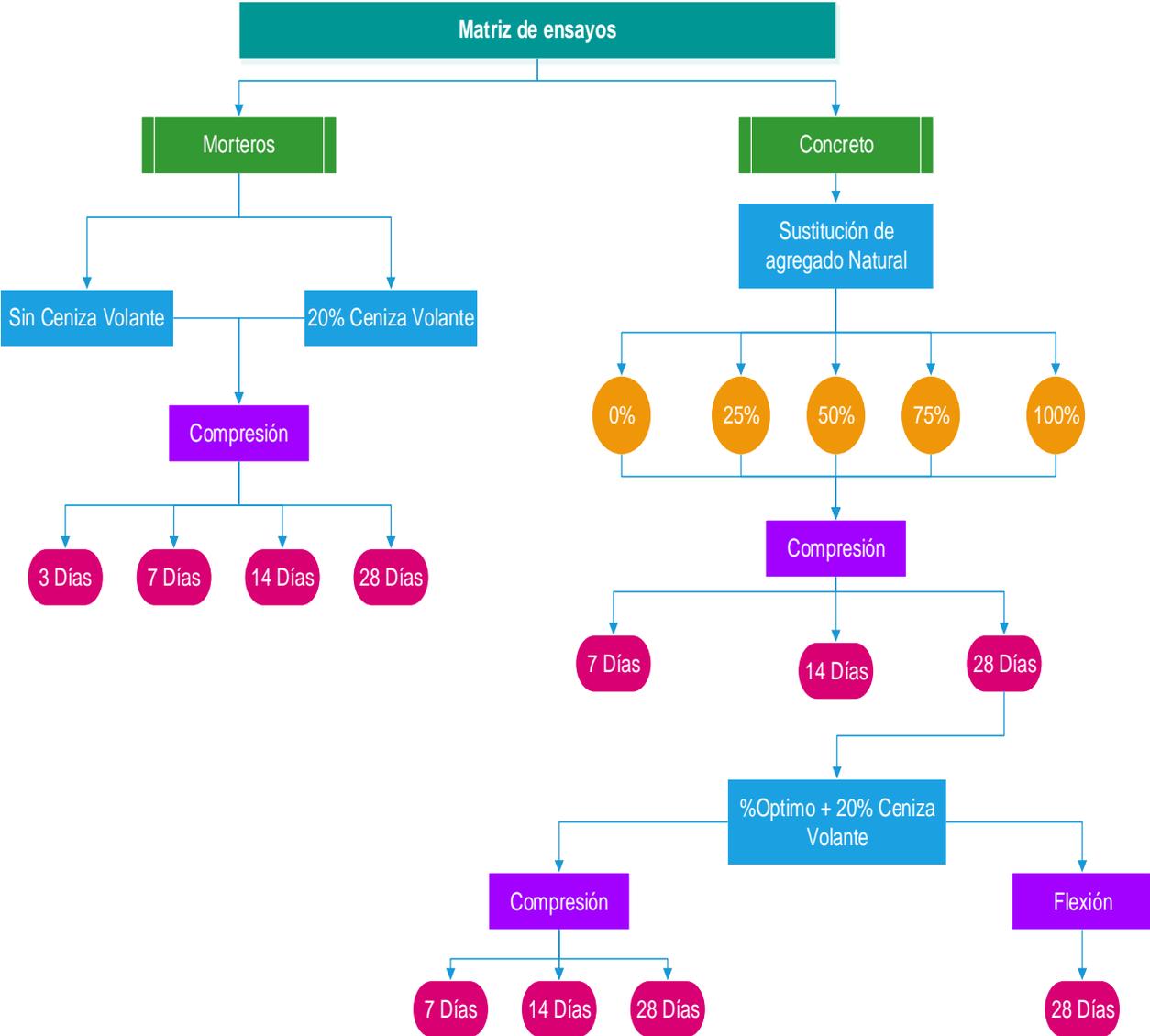
6.8.4. Fase 4

Diseño de mezcla del porcentaje de sustitución óptimo con una adición del 20% de ceniza volante y ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión.

- *Actividad 4.1.* Proponer el diseño de mezcla para el porcentaje de sustitución óptimo, con una adición de ceniza volante.
- *Actividad 4.2.* Realizar la mezcla de concreto y fundir los cilindros y viguetas de concreto para el porcentaje de sustitución óptimo.
- *Actividad 4.3.* Sumergir los cilindros y las viguetas en la pileta de agua, para su respectivo curado.
- *Actividad 4.4.* Realizar el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, para edades de curado de 7, 14 y 28 días, y realizar el ensayo de resistencia a la flexión para viguetas a 28 días de curado.

6.9. MATRIZ DE ENSAYOS

Figura 4 Matriz de ensayos



Fuente: Autores, 2017

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL EL CEMENTO, LA CENIZA VOLANTE Y LOS AGREGADOS NATURALES Y EL AGREGADO GRUESO RECICLADO, DE ACUERDO A LA NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC).

Es de gran importancia la identificación de los materiales, y la obtención de sus características, para ello es pertinente realizar ensayos para conocer la viabilidad de los materiales.

El primer material que se analizó fue el cemento “Argos”; al que se le hizo el ensayo de finura por el método de tamizado y posteriormente se realizó el ensayo de densidad del cemento mediante la utilización del frasco Le Chatelier, consistencia de la pasta de cemento y su tiempo de fraguado.

El segundo material que se analizó fue la ceniza volante procedente de la termoeléctrica de Paipa; al que se le realizó ensayo de finura, peso específico mediante la utilización del frasco Le Chatelier.

Por último, los materiales a que se analizaron fueron las gravas tanto gruesas como finas incluida la grava gruesa reciclada; a estas gravas se les realizó el ensayo de granulometría por el método de tamizado manual, masas unitarias, capacidad de absorción.

7.1.1. Cemento Portland

7.1.1.1. *Peso específico cemento portland argos.* Para llevar a cabo el ensayo de peso específico se tomaron en cuenta los parámetros recomendados por la NTC 221 (Norma Técnica Colombiana).

Materiales:

- Frasco de Le Chatelier
- Kerosene
- 64g de Cemento Argos.

Figura 5 Frasco Le Chatelier



Fuente: Autores, 2016

Se procede a verter el Kerosene hasta una lectura del frasco Le Chatelier que se encuentra entre 0 – 1cm³. Luego se procede a verter los 64g. De Cemento portland Argos.

Cálculo:

Para determinar el peso específico se realizaron tres ensayos para tomar un valor promedio.

$$\rho(g/cm^3) = \frac{\text{Masa del cemento, } g}{\text{Volumen desplazado, } cm^3}$$

Donde el volumen desplazado, corresponde a la diferencia entre la lectura final y la lectura inicial de líquido, con los resultados obtenidos, se saca una media aritmética y se determina la densidad del cemento.

Tabla 7 Densidad Cemento Portland Argos

Peso Específico del Cemento Frasco de Le Chatelier			
N° de Ensayos	1	2	3
Lectura inicial de Líquido (cm ³)	0,5	0,4	0,6
Lectura Inicial (cm ³)	23,3	23,5	23,8
Lectura Final (cm ³)	22,8	22,5	22,7
Cantidad de Cemento (g)	64	64	64
Densidad (g/cm ³)	2,870	2,896	2,896
Promedio Densidad (g/cm³)	2,887		

Fuente: Autores, 2016

El peso específico obtenido para el cemento fue de 2,887g/cm³. Valor cercano al rango establecido por la literatura Tecnología del Concreto y del mortero de Sánchez de guzmán 3,0 – 3,15g/cm³. Este resultado se encuentra por debajo del rango establecido, posiblemente el cemento tiene algún tipo de adición puzolánica diferente al yeso. El resultado no es índice de la calidad del material, pero sí ayuda a identificar de cierta manera si el cemento tiene adiciones o no.

7.1.1.2. *Finura Por El Método De Tamizado.* Los parámetros recomendados por la NTC 226 (Norma Técnica Colombiana) son los siguientes.

Materiales:

- Tamiz N°200 (75 μ m)
- Balanza

Se procede a tomar 50g de Cemento Argos, posteriormente se toma la muestra de cemento previamente pesada vertiéndola en su totalidad en el Tamiz N°200, se tamiza la muestra durante 5 minutos y después de esto se procede a pesar la muestra depositada en el fondo del tamiz y la retenida en el tamiz como se muestra en la siguiente figura 6 y después del tamizado la figura 7.

Figura 6 Tamiz N°200 y la muestra



Fuente: Autores, 2016

Figura 7 Muestra pasa Tamiz N°200



Fuente: Autores, 2016

$$F = 100 - \left[\left(\frac{46,9g * 100}{50g} \right) \right]$$

$$F = 100\% - 93,8\%$$

$$F = 6,2\%$$

Para determinar el valor verdadero es necesario recurrir a la corrección por tamizado, como el tamiz para el ensayo es N°200 (75µm) se toma el valor dado por la Norma Técnica Colombiana NTC 226 de 0,2%

$$Rc = \left[\left(\frac{46,9g * 100}{50g} \right) \right] - 0,2\%$$

$$Rc = 93,8 - 0,2\%$$

$$Rc = 93,6\%$$

Por lo tanto, el valor verdadero de finura es

$$F = 100\% - 93,6\%$$

$$F = 6,4\%$$

La finura del cemento es de 6,4% con una retención del 93,6% en el Tamiz N°200. Lo anterior indica que es un cemento Portland con partículas gruesas, lo que generaría que los tiempos de fraguado sean mayores, una posible exudación de agua por su escasa capacidad de retención y un proceso lento para alcanzar la resistencia. Partículas muy gruesas pueden duran varios años en hidratasen e inclusive no llegar a hidratarse, lo cual daría un rendimiento escaso del cemento portland.

7.1.1.3. *Consistencia normal y tiempos de fraguado para pasta de cemento.*

Parámetros principales o recomendaciones dados por la Norma Técnica colombiana NTC 110 y la NTC 118.

Materiales:

- Probeta 200cm³ o 250cm³
- Aparato de Vicat
- Balanza Amasadura mecánica (capacidad de 4,732 Litros)
- Molde de Vicat con diámetro de 70 cm.

Se procede a escoger el tipo de cemento que en este caso es Argos; y se obtiene una muestra de 600g, posteriormente se mezcla con agua. La proporción utilizada para la relación A/C es de 0,29.

Se mezcla durante 30 segundos a velocidad media, se detiene la mezcla durante 15 segundos y se aumenta la velocidad y se pone en marcha la máquina por un tiempo que ahora es de un minuto, se moldea el material en un recipiente donde posteriormente se le realizará la penetración normal del material con la aguja de Vicat.

La siguiente tabla 8 expresa el volumen de agua adicionado al cemento, con el que realiza el procedimiento anteriormente descrito, realizando una primera prueba que es de penetración para determinar la consistencia normal de la pasta de cemento, se obtuvo un resultado de penetración de 9 milímetros (mm), se comprueba que cumple con la consistencia, dado que la norma NTC 110 establece un rango de 8 a 10 mm.

Tabla 8 Datos para obtención de Consistencia y Tiempo de Fraguado

Consistencia del Cemento Argos		
Peso Cemento	600	g
A/C	0,29	%
Volumen de agua	174	cm ³
Consistencia	9	mm

Fuente: Autores, 2016

Figura 8 Lectura inicial de tiempo de fraguado de la pasta de cemento



Fuente: Autores, 2017

Luego se procede a tomar lecturas del fraguado de cemento.

Tabla 9 Registro de penetración y tiempo de fraguado de la pasta de Cemento

Cemento		
Tiempos de Fraguado		
Lectura	Penetración (mm)	Tiempo (min)
1	40	60
2	40	120
3	38	150
4	37,33	165
5	36	180
6	3	195
7	1	210
8	0,5	225
9	0	240

Fuente: Autores, 2017

Basados en las lecturas del equipo se obtuvo la gráfica ilustrada en la figura 9, que permite deducir que el cemento cumple su tiempo de fraguado en 5 horas con 32 minutos, lo cual es bastante, pero a su vez se observa que dura 3 horas para fraguar su contenido de agua manteniendo un valor constante de humedad, pero poco a poco al interactuar con la temperatura ambiente de 20 grados centígrados (20°) se realiza su secado o fraguado final.

Figura 9 Penetración vs Tiempo



Fuente: Autores, 2017

7.1.2. Ceniza Volante

7.1.2.1. *Peso específico.* Para determinar el peso específico de la ceniza volante, se hace mediante el mismo método utilizado para determinar el del cemento, a continuación, se relacionan los resultados obtenidos y el valor del peso específico o densidad de la ceniza volante en la tabla 10.

Tabla 10 Densidad Ceniza Volante

Peso específico Ceniza Volante Frasco de Le Chatelier			
N° de ensayos	1	2	3
Lectura inicial de Liquido (cm ³)	0,7	0,5	0,8
Lectura Inicial (cm ³)	24,5	23,8	24,5
Lectura Final (cm ³)	23,2	23,4	23,2
Cantidad de Cemento (g)	47	47	47
Densidad (g/cm ³)	1,975	2,017	1,983
Promedio Densidad (g/cm³)	1,992		

Fuente: Autores, 2017

El peso específico de la ceniza volante es de 1,992 g/cm³ es aproximadamente un 69% menos densa que el cemento portland, por tanto, se tendría un concreto más liviano que el convencional.

7.1.2.2. *Consistencia normal y tiempos de fraguado para 20% de sustitución de cemento portland por ceniza volante.* Para determinar la consistencia normal de la ceniza volante y el tiempo de fraguado es necesario utilizar la Norma Técnica Colombiana NTC 110 y NTC 118 y recurrir a los pasos y cálculos del ítem 7.1.1.3. “Consistencia Normal y tiempos de fraguado para pasta de cemento “a diferencia de la consistencia del cemento portland, la consistencia de la ceniza volante es de

0,33 como lo indica la tabla 11 con una penetración 10mm cumpliendo con los rangos de 9 mm – 11 mm de penetración de la norma NTC 110.

Tabla 11 Consistencia Ceniza volante

Consistencia del Cemento Argos		
Peso Cemento Portland	480	g
Peso Ceniza volante (20% de sustitución de cemento)	120	g
$A/(C+Cv)$	0,33	
Agua	198	cm ³
Consistencia	10	mm

Fuente: Autores, 2017

Es necesario tener en cuenta que la ceniza volante necesita mayor porcentaje de agua que la pasta de cemento. Por lo tanto, su resistencia será menor que la pasta de cemento, porque al tener una relación $A/(C+Cv)$ 0,33 para una sustitución del 20% de ceniza volante, la pasta de cemento severa afectada en su resistencia por la cantidad de agua que se necesita.

Tabla 12 Tiempo de Fraguado del 20% ceniza y cemento portland

%20 Ceniza Volante		
Tiempos de Fraguado		
Lectura	Penetración (mm)	Tiempo (min)
1	40	60
2	40	120
3	40	180
4	39	210
5	38	225
6	35	240
7	33	255
8	28	270
9	13	285
10	4	300
11	3	315
12	0,5	330
13	0	345

Fuente: Autores, 2017

Al igual que la pasta de cemento es necesario realizar el tiempo de fraguado del 20% de ceniza volante con cemento. En la tabla 12 nos ayuda a determinar que el tiempo de fraguado de esta mezcla entre ceniza volante con cemento portland es más lento que sin ceniza. El fraguado inicial de esta pasta esta alrededor de las tres horas y su fraguado final ronda las 5 horas y media un valor muy alto a comparación de la pasta de cemento portland. Sin embargo, el tiempo de fraguado cumple con la NTC118.

En la gráfica ilustrada en la figura 10 esta detallado el tiempo de fraguado de la ceniza volante.

Figura 10 Tiempo de Fraguado de la Ceniza Volante



Fuente: Autores, 2017

Al tener un fraguado tan lento esto indica que la pasta que conformara el concreto necesitara más tiempo que el convencional para llegar al estado endurecido que es la etapa en la que se gana resistencia.

7.1.2.3. *Finura por el método de tamizado.* Al igual que con el ensayo para determinar el peso específico de la ceniza volante, para el ensayo de finura, se utilizó el mismo método que con el cemento. Por lo anterior, solamente se relacionan los resultados obtenidos para este ensayo.

Para determinar el valor verdadero es necesario recurrir a la corrección por tamizado, como el tamiz N°200 (75µm) para el ensayo. Se toma el valor de corrección dado por la Norma Técnica Colombiana NTC 226 de 0,2%

$$RC = \left[\left(\frac{27,38g * 100}{50g} \right) \right] - 0,2\%$$

$$Rc = 54,76 - 0,2\%$$

$$Rc = 54,56\%$$

$$F = 100\% - 54,56\%$$

$$F = 45,44\%$$

La ceniza tiene un porcentaje de finura de 45,44% lo que nos da a entender que es un material muy fino y por tanto ayudara a la resistencia del concreto a largo tiempo. Al tener una ceniza con un porcentaje de finura superior a la del cemento, se puede analizar que la resistencia de la pasta que conformará al concreto, probablemente tendrá una resistencia mayor por la cantidad de partículas que pueden llegarse acomodar en la mezcla de concreto.

7.1.2.4. *Ensayo de fluorescencia de rayos x (FRX).* Este ensayo, permite determinar la composición química del material, tanto elementos como compuestos químicos que forman parte de su estructura. El ensayo se realiza con el fin de poder clasificar la ceniza, y para realizarlo, se recurrió a los laboratorios de la universidad Nacional de Colombia y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 13 Resultados ensayo FRX

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	(% en peso)
Silicio	SiO ₂	61,57%

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	(% en peso)
Aluminio	Al ₂ O ₃	24,70%
Hierro	Fe ₂ O ₃	5,18%
Azufre	SO ₃	1,98%
Potasio	K ₂ O	1,53%
Titanio	TiO ₂	1,34%
Calcio	CaO	1,21%
Fósforo	P ₂ O ₅	0,98%
Magnesio	MgO	0,60%
Sodio	Na ₂ O	0,53%
Estroncio	Sr	0,11%
Bario	Ba	0,08%
Zirconio	Zr	0,04%
Vanadio	V	0,03%
Cerio	Ce	0,03%
Cromo	Cr	185 ppm
Zinc	Zn	173 ppm
Manganeso	MnO	148 ppm
Plomo	Pb	111 ppm
Cobalto	Co	105 ppm
Rubidio	Rb	91 ppm
Itrio	Y	64 ppm
Galio	Ga	46 ppm
Niobio	Nb	38 ppm
Cobre	Cu	30 ppm

Fuente: Autores,2017

De los resultados obtenidos, se pudo clasificar la ceniza utilizada como una ceniza clase F, que según la norma NTC 3493⁵², este tipo de puzolana debe tener un porcentaje mínimo de 70% de dióxido de silicio (SiO₂) + óxido de aluminio (Al₂O₃) + óxido de hierro (Fe₂O₃), para esta ceniza, se obtuvo un porcentaje de 91,45%,

⁵² NTC 3493: Cenizas Volantes y Puzolanas Naturales, Calcinadas o Crudas, Utilizadas como Aditivos Minerales en el Concreto de Cemento Portland.

además, debe contener un porcentaje máximo de 5% de trióxido de azufre (SO_3) que en este caso era de 1,98%. Por último, debe tener un porcentaje máximo de 10% de óxido de calcio, que para esta ceniza es de 1,21%. Esta clasificación, según la NTC 3493⁵³, corresponde a una ceniza producida normalmente en la quema del carbón antracítico o bituminoso y es una ceniza con propiedades puzolánicas.

7.1.3. Agregado Grueso Natural

7.1.3.1. *Masas unitarias sueltas.* Para llevar a cabo este ensayo se tomarán en cuenta los parámetros recomendados por la NTC 92, para determinar las masas unitarias sueltas del agregado grueso natural.

Materiales:

- Balanza
- Molde
- Muestra de agregado grueso natural

Se procede a determinar el volumen del molde y su peso en kg, de igual forma, la muestra debe cumplir los requisitos de la NTC 129. Se toman 35 kg de agregado grueso para realizar un cuarteo, esto para seleccionar la muestra a ensayar.

Con la ayuda de una pala se llena completamente el molde, se nivelará la superficie del agregado con la varilla de apisonamiento o con los dedos para luego pesar este material.

En la siguiente tabla 14 se expresan los pesos y el volumen del molde y de la muestra a ensayar. Para el ensayo se tomará un molde con un diámetro de 25,4

⁵³ IBID, P. 2.

cm y una altura 27,8 cm. El agregado grueso natural tiene una masa unitaria suelta de 1,43 g/cm³.

Tabla 14 Masa Unitaria Suelta agregado grueso natural

Agregado Grueso Suelto		
Masa del Agregado + Molde	28860	g
Masa del Molde	8755	g
Volumen del Molde	14066,4	cm ³
Masa Unitaria Suelta	1,43	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M. U. Suelta = \left[\frac{(28860g - 8755g)}{14066,4cm^3} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en kg/cm³

$$M. U. Suelta = 1429 kg/m^3$$

El valor de masas unitarias sueltas del agregado es necesario para realizar el diseño de mezcla de concreto. Las masas unitarias sueltas es un valor importante para tener en cuenta la cantidad de volumen necesario a la hora de transportar el material.

7.1.3.2. *Masa unitaria compacta o apisonada.* Este ensayo debe cumplir con la NTC 92 al igual que las masas unitarias sueltas. Sin embargo, los pasos a realizar el ensayo son distintos.

Materiales:

- Balanza
- Molde
- Varilla de apisonamiento
- Pala
- Muestra

Se procede a determinar el volumen del molde y un cuarteo a la muestra a ensayar. Se llenará una tercera parte del molde y se apisonará con 25 golpes con la varilla de apisonamiento. Luego se completan las dos terceras partes del molde, se nivela y se apisona 25 golpes y finalmente se llenará el molde por encima del nivel apisonando con 25 golpes y se nivelará. Se tomará el molde con la muestra pesándolo en la balanza.

En la tabla 15 se expresan las masas tanto del molde como la muestra y el volumen del molde. Para este ensayo se utiliza un molde grande con un diámetro de 25,4 cm y una altura de 27,8 cm. La masa unitaria compacta del agregado grueso natural es de 1,55 g/cm³

Tabla 15 Masa Unitaria Compacta Agregado grueso natural

Agregado Grueso Compactado		
Masa del Agregado + Molde	30517	g
Masa del Molde	8755	g
Volumen del Molde	14066,4	cm ³
Masa Unitaria del Agregado	1,55	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M.U. compacta = \left[\frac{(30517g - 8755g)}{14066,4cm^3} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en kg/cm^3

$$M.U. compacta = 1547 \text{ kg/m}^3$$

Al igual que las M.U. sueltas, la masa unitaria compacta es vital para el diseño de mezcla de concreto, además, da a entender el grado de acomodamiento de las partículas de agregado cuando son sometidas a un vibrado y la cantidad de partículas que se confinarán dentro de la masa de concreto.

7.1.3.3. *Densidad aparente y % absorción.* Para llevar a cabo el ensayo es necesario recurrir a la NTC 176 para determinar la densidad aparente y la absorción del agregado grueso natural.

Materiales:

- Balanza
- Recipiente de la muestra
- Tanque de agua
- Tamices
- Muestra de agregado grueso natural
- Horno

Se procede a realizar un lavado al material para retirar el exceso de finos que pueden estar adheridos a la muestra. Luego se tomarán 6 kg de muestra el cual se sumergirán en agua por 24 horas. Pasado el tiempo sumergida la muestra, se tomará una toalla y se secará partícula a partícula hasta obtener 5 kg como muestra final (muestra parcialmente seca). Se procede a utilizar una malla tipo molde, el cual tendrá los 5 kg de muestra y esta será sumergida en un tanque de agua hasta cubrir completamente el molde (muestra saturada superficialmente).

Por último, se coloca la muestra en una bandeja y se introduce en el horno por un tiempo de 24 horas, pasado el tiempo se retira la muestra del horno y se deja por 3 horas a temperatura ambiente para luego tomar la lectura final (muestra Seca).

Cálculos:

Para determinar la densidad es necesario recurrir a la siguiente ecuación

$$D_s = 0.9975 \left[\frac{A}{B - C} \right]$$

En la siguiente tabla 16 se muestran los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 16 Pesos del ensayo densidad y absorción

Agregado Grueso Natural			
A	Muestra secado al Horno	4875	g
B	Muestra saturada y superficialmente Seca	5000	g
C	Masa en el agua de la muestra saturado	3040,8	g

Fuente: Autores, 2017

$$D_s = 0.9975 \left[\frac{4875g}{5000g - 3040,8g} \right]$$

$$D_s = 2,48g/cm^3$$

La densidad aparente del material es 2,48 g/cm³. Para determinar la absorción del material es necesario recurrir a la siguiente ecuación dada por la NTC 176.

$$Absorción(\%) = \left[\frac{(B - A)}{A} \right] * 100$$

$$\text{Absorción}(\%) = \left[\frac{(5000g - 4875g)}{4875g} \right] * 100$$

$$\text{Absorción}(\%) = 2,56\%$$

El valor de densidad aparente obtenido, es útil para conocer la cantidad de material en peso, que se requiere para un volumen determinado de concreto. Además, el porcentaje de absorción es un índice que permite estimar la cantidad de agua de más, que se requiere para el diseño de mezcla, dado que el material absorbe una parte de ella.

7.1.3.4. *Granulometría del agregado grueso.* Para la determinación de la granulometría del agregado grueso natural se recurre a la NTC 1522.

Materiales:

- Balanza
- Tamices (3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8 y N°16)
- Horno

Se procede a realizar un cuarteo para tomar cierta cantidad de material en este caso se tomarán 1930 g para realizar un tamizado manual a la muestra, en la tabla 17 se muestra el resultado del tamizado por un periodo de 15 minutos.

Sin embargo, realizar el tamizado el material que pasó los tamices no fue el mismo que ingresó, por lo tanto, es necesario realizar una corrección a todos los pesos retenidos en los tamices.

$$X = 100\% \left(\frac{84,4g}{1928,9g} \right) = 4,38\%$$

$$X1 = \left[\frac{4,38\% * 1,4g}{100\%} \right] = 0,0613g$$

$$\text{Corrección retenido} = 84,4g + 0,0613g = 84,46g$$

Luego de la obtención de la corrección del retenido se determinará el porcentaje retenido en cada tamiz

$$\%ret = \left[\left(\frac{84,46g}{1930g} \right) * 100\% \right] = 4,4\%$$

Con el porcentaje retenido se procede a calcular el porcentaje retenido acumulado.

$$\% ret. Acumulado = 4,4\% + 18,8\% = 23,2\%$$

Por último, se determina el porcentaje que pasa para luego graficar este valor y verificar que tan bien gradado o mal gradado, como la muestra la figura 11.

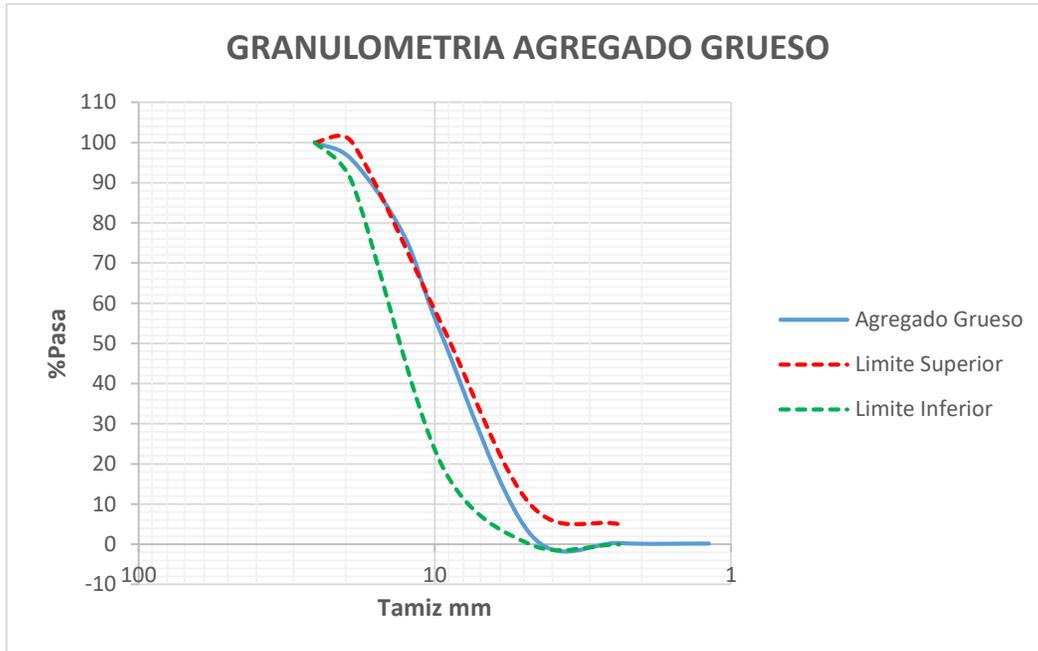
$$\%pasa = 100\% - 23,2\% = 76,8\%$$

Tabla 17 Granulometría de Agregado Gueso

Tamiz		Peso Retenido Gramos	Retenido Corregido	Retenido	Retenido Acumulado	Pasa
mm	in.	g	g	%	%	%
50,8	2	0	0,00	0,0	0,00	100,00
38,1	1 1/2	0	0,00	0,0	0,00	100
25,4	1	0	0,00	0,0	0,00	100
19	3/4	84,4	84,46	4,4	4,4	95,6
12,7	1/2	362,9	363,16	18,8	23,2	76,8
9,51	3/8	473,2	473,54	24,5	47,7	52,3
4,76	N°4	959,4	960,10	49,7	97,5	2,5
2,38	N°8	42,9	42,93	2,2	99,7	0,3
1,19	N°16	2,3	2,30	0,1	99,8	0,2
Fondo		3,5	3,50	0,2	100,00	0,0
Total		1928,6	1930	100,0		
Peso inicial		1930				

Fuente: Autores, 2017

Figura 11 Granulometría Agregado Grueso Natural %Pasa vs Tamices



Fuente: Autores, 2017

El porcentaje que pasa debe cumplir con los límites superiores e inferiores de la NTC 174 si llegase a no cumplir la granulometría es necesario recurrir al análisis granulométrico por el método gráfico, esto con el fin de obtener una proporción adecuada de agregado grueso y fino en la mezcla de concreto. Al observar la gráfica ilustrada en la figura 11, por un porcentaje mínimo el agregado grueso no cumple con los límites de la NTC 174 para un agregado de tamaño máximo de una pulgada (1"), como se muestra en la tabla 18, por lo que es necesario recurrir al método gráfico para determinar el porcentaje a utilizar de agregado grueso en la mezcla de diseño.

Tabla 18 límites para agregados gruesos de TM de 1" NTC 174

Norma Icontec NTC 174			
In	mm	Límite Superior	Límite inferior
1	25,4	100	100
¾	19	100	90
3/8	9,51	55	20
N°4	4,76	10	0
N°8	2,38	5	0

Fuente: Icontec, NTC 174, 2008⁵⁴

Las formas de las partículas del agregado juegan un papel muy importante en la fabricación de concreto, debido al tipo de compactación de la mezcla de concreto, esta no depende de la granulometría sino del grado de acomodamiento de las partículas. Además, es importante conocer el tamaño máximo de las partículas, dado que para elementos estructurales prismáticos (tipo viga), se debe contar con el espacio disponible entre las varillas del acero de refuerzo.

7.1.4. Agregado Grueso Reciclado.

7.1.4.1. *Masa unitaria suelta (M.U. suelta)*. Para llevar a cabo este ensayo se tomarán en cuenta los parámetros recomendados por la NTC 92 porque no existe una norma para materiales reciclados, entonces se procede a determinar las masas unitarias sueltas del agregado grueso reciclado con la misma metodología utilizada para agregados gruesos naturales.

Materiales:

⁵⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Concretos – Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C: el instituto, 2000 Pág. 8

- Balanza
- Molde
- Muestra de agregado grueso reciclado

Se procede a determinar el volumen del molde y su peso en kg de igual forma, la muestra debe cumplir los requisitos de la NTC 129. Se toman 35 kg de agregado grueso reciclado para realizar un cuarteo para seleccionar la muestra a ensayar

Con la ayuda de una pala se llena completamente el molde, se nivelará la superficie del agregado con la varilla de apisonamiento o con los dedos para luego pesar este material.

En la siguiente tabla 19 expresa los pesos y el volumen del molde y de la muestra a ensayar. Para el ensayo se tomará un molde con un diámetro de 25,4 cm y una altura 27,8 cm. El agregado grueso reciclado tiene una masa unitaria suelta de 1254 kg/m³.

Tabla 19 Masas Unitarias sueltas del Agregado Reciclado

Agregado Grueso Reciclado Suelto		
Masa del Agregado + Molde	26396	g
Masa del Molde	8755	g
Volumen del Molde	14066,4	cm ³
Masa Unitaria del Agregado	1,254	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M.U.suelta = \left[\frac{(26396g - 8755g)}{14066,4cm^3} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en kg/cm³

$$M.U.suelta = 1254 kg/m^3$$

Las masas unitarias sueltas del agregado grueso reciclado son menos densas que un agregado natural. A la hora de transportar este material será más beneficioso al compararlo en costos. Porque para un mismo volumen el agregado reciclado ocupara menos que uno natural. Por lo tanto, se puede transportar más material. La masa unitaria suelta del agregado reciclado es un dato valido para el diseño de mezcla de concreto.

7.1.4.2. *Masas unitarias compactas.* Como en el anterior caso es necesario recurrir a la NTC 92 para agregados gruesos reciclados. Sin embargo, los pasos a realizar el ensayo son distintos.

Materiales:

- Balanza
- Molde
- Varilla de apisonamiento
- Pala
- Muestra

Se procede a determinar el volumen del molde y un cuarteo a la muestra a ensayar. Se llenará una tercera parte del molde y se apisonará con 25 golpes con la varilla de apisonamiento. Luego se completan las dos terceras partes del molde, se nivela y se apisona 25 golpes y finalmente se llenará el molde por encima del nivel apisonando con 25 golpes y se nivelará. Se tomará el molde con la muestra pesándolo en la balanza.

En la tabla 20 se expresan las masas tanto del molde como la muestra y el volumen del molde. Para este ensayo se utiliza un molde grande con un diámetro de 25,4 cm y una altura de 27,8 cm. La masa unitaria compacta del agregado grueso reciclado es de 1,391 g/cm³.

Tabla 20 Pesos de las muestras para Densidad y % Absorción

Agregado Grueso Reciclado Compactado		
Masa del Agregado + Molde	28323	g
Masa del Molde	8755	g
Volumen del Molde	14066,4	cm ³
Masa Unitaria del Agregado	1,391	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M.U. compacta = \left[\frac{(28323g - 8755g)}{14066,4cm^3} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en Kg/cm³

$$M.U. compacta = 1391 kg/m^3$$

Las masas unitarias compactas del agregado reciclado son menos densas que el agregado grueso natural, lo que dará un concreto más liviano.

7.1.4.3. *Densidad aparente seca (Ds) y % absorción.* Para llevar a cabo el ensayo es necesario recurrir a la NTC 176 para determinar la densidad aparente y la absorción del agregado grueso reciclado.

Materiales:

- Balanza
- Recipiente de la muestra
- Tanque de agua
- Tamices

- Muestra Ag. Reciclado
- Horno

Se procede a realizar un lavado al material para retirar el exceso de finos que pueden estar adheridos a la muestra. Luego se tomarán 6 kg de muestra el cual se sumergirán en agua por 24 horas. Pasado el tiempo sumergida la muestra, se tomará una toalla y se secará partícula a partícula hasta obtener 5 kg como muestra final (muestra parcialmente seca). Se procede a utilizar una malla tipo molde, el cual tendrá los 5 kg de muestra y esta será sumergida en un tanque de agua hasta cubrir completamente el molde (muestra saturada superficialmente). Por último, se coloca la muestra en una bandeja y se introduce en el horno por un tiempo de 24 horas, pasado el tiempo se retira la muestra del horno y se deja por 3 horas a temperatura ambiente para luego tomar la lectura final (muestra Seca).

Para determinar la densidad es necesario recurrir a la siguiente ecuación

$$D_s = 0.9975 \left[\frac{A}{B - C} \right]$$

En la siguiente tabla 21 se muestran los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 21 Densidad Aparente Seca del Ag. Reciclado

Agregado Grueso Reciclado			
A	Muestra secado al Horno	4740	g
B	Muestra saturada y superficialmente Seca	5000	g
C	Masa en el agua de la muestra saturado	2966,2	g

Fuente: Autores, 2017

$$D_s = 0.9975 \left[\frac{4740g}{5000g - 2966,2g} \right]$$

$$D_s = 2,32g/cm^3$$

La densidad aparente del material es 2,32g/cm³. Para determinar la absorción del material es necesario recurrir a la siguiente ecuación dada por la NTC 176.

$$Absorción(\%) = \left[\frac{(B - A)}{A} \right] * 100$$

$$Absorción(\%) = \left[\frac{(5000g - 4740g)}{4740g} \right] * 100$$

$$Absorción(\%) = 5,49\%$$

La capacidad de absorción del agregado reciclado es mayor que un natural. Porque según la literatura Tecnología del concreto y del mortero las absorciones de un agregado grueso están entre 0% – 5%. Esta absorción alta se debe a las partículas cementantes que contiene el mortero adherido al agregado que por motivos de finura no llegaron a hidratarse.

7.1.4.4. *Granulometría del agregado grueso reciclado.* Para la granulometría del agregado grueso reciclado se recurre a la NTC 1522 e igual que el ítem 7.1.3.4. “Granulometría Del Agregado Grueso Natural” donde están descritos los procedimientos y los materiales a utilizar.

Para determinar la granulometría de este material se realizó un cuarteo para tomar una cantidad de material. Se tomaron 1915 g para realizar un tamizado manual a la muestra, en la tabla 22 se ilustra el resultado del tamizado por un periodo de 15 minutos.

Al realizar el tamizado, el material que pasó los tamices no fue el mismo que se tomó inicialmente, por lo tanto, es necesario realizar una corrección a todos los pesos retenidos en los tamices como se realizó en el ítem 7.1.3.4. utilizando las fórmulas descritas en el numeral ya mencionado.

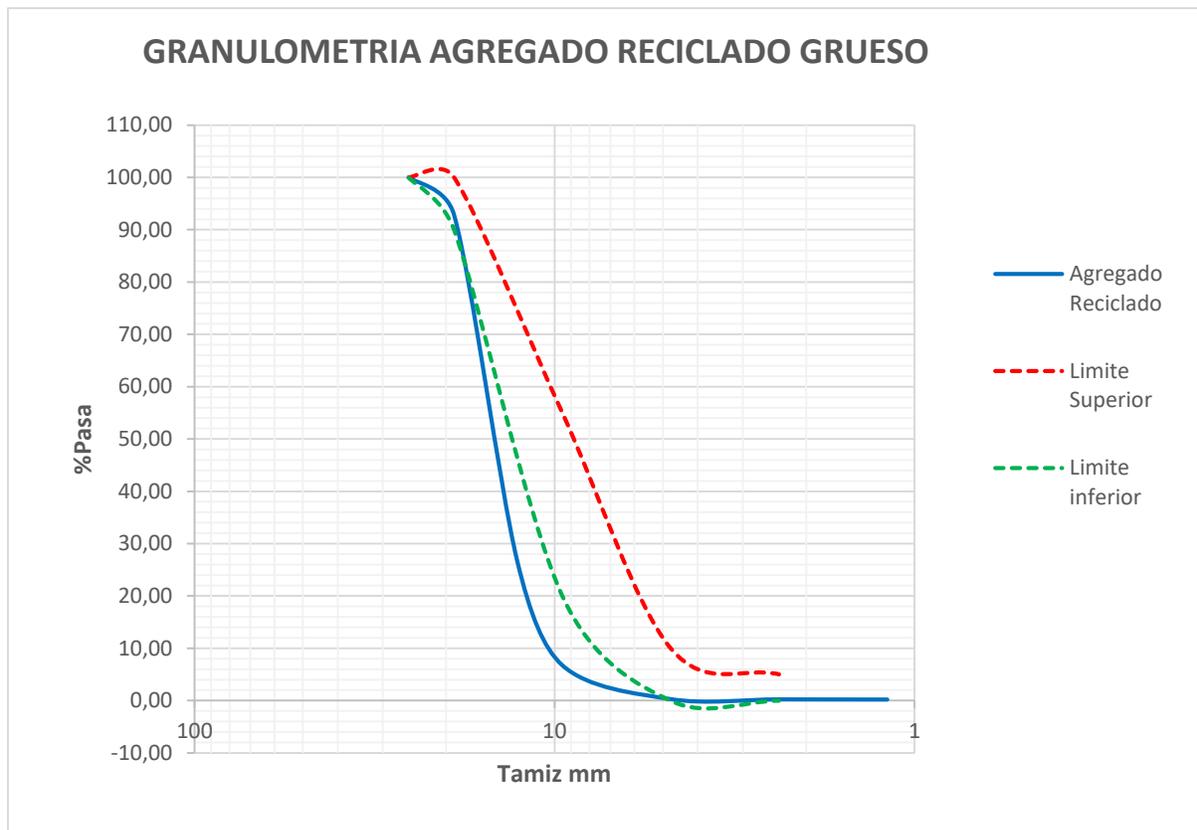
Tabla 22 Granulometría Agregado Reciclado

Tamiz		Peso Retenido Gramos	Retenido Corregido	Retenido	Retenido Acumulado	Pasa
mm	in.	g	g	%	%	%
50,8	2	0	0,00	0,00	0,0	100,00
38,1	1 1/2	0	0,00	0,00	0,0	100,00
25,4	1	0	0,00	0,00	0,0	100,00
19	3/4	136,8	136,90	7,15	7,1	92,85
12,7	1/2	1263,6	1264,52	66,03	73,2	26,82
9,51	3/8	384,2	384,48	20,08	93,3	6,74
4,76	N°4	123,9	123,99	6,47	99,7	0,27
2,38	N°8	1	1,00	0,05	99,8	0,21
1,19	N°16	0,6	0,60	0,03	99,8	0,18
Fondo		3,5	3,50	0,18	100	0,00
Total		1913,6	1915,00	100		
Peso inicial		1915				

Fuente: Autores, 2017

Al hallar el % pasa es necesario realizar la gráfica % pasa vs Tamiz en mm a lo que se le conoce como granulometría de un material. La granulometría debe cumplir con los límites de gradación de la Norma Icontec NTC 174; es necesario utilizar tabla 18 “Límites para Agregados Gruesos NTC 174”.

Figura 12 Granulometría Agregado Reciclado %pasa vs Tamiz mm



Fuente: Autores, 2017

El agregado reciclado no cumple con los límites de la NTC 174 por lo tanto es necesario realizar el análisis granulométrico, por el método gráfico para determinar el porcentaje de agregado para el diseño de mezcla de concreto.

7.1.5. Agregado Fino

7.1.5.1. *Masa unitaria suelta.* Para este ensayo, se utiliza el mismo método que para agregados gruesos, descrito en la norma NTC 92, con la única diferencia que, para agregados finos, se utiliza un molde de menor tamaño y, por lo tanto, menor cantidad de material.

En la siguiente tabla 23, se relacionan los resultados obtenidos del ensayo en el laboratorio.

Tabla 23 Masa unitaria suelta agregado fino

Agregado Fino Suelto		
Masa del Agregado + Molde	6283	g
Masa del Molde	2184	g
Volumen del Molde	2757,8	cm ³
Masa Unitaria del Agregado	1,486	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M.U \text{ suelta} = \left[\frac{6283 - 2184}{2757,8} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en kg/cm³.

$$M.U. \text{ suelta} = 1486 \text{ kg/m}^3$$

Dato importante para el diseño de mezcla de concreto.

7.1.5.2. *Masa unitaria compacta.* Para este ensayo, al igual que para el de masas unitarias sueltas, se utiliza el mismo procedimiento que para agregado grueso y con las mismas condiciones del tamaño del molde, procedimiento descrito en la NTC 92.

Se obtuvieron los siguientes resultados como lo muestra la tabla 24:

Tabla 24 Masa unitaria compactada agregado fino

Agregado Fino Compactado		
Masa del Agregado + Molde	6570	g
Masa del Molde	2184	g
Volumen del Molde	2757,8	cm ³
Masa Unitaria del Agregado	1,590	g/cm ³

Fuente: Autores, 2017

$$M.U. compactada = \left[\frac{6570g - 2184g}{2757,8cm^3} \right] \times 1000$$

Se multiplica por 1000 para obtener el valor en kg/cm³

$$M.U. compactada = 1590 kg/m^3$$

7.1.5.3. *Densidad aparente seca y % absorción.* Para este ensayo, se utiliza el método descrito por la norma NTC 237.

Materiales:

- Picnómetro
- Bomba de vacío
- Balanza
- Muestra de agregado fino

- Molde
- Pisón

Se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla 25.

Tabla 25 Datos tomados en el Laboratorio

Agregado Fino			
A	Muestra secado al Horno	491,8	g
B	Masa del picnómetro lleno con agua	690	g
S	Masa en el agua de la muestra saturado	500	g
C	Masa del picnómetro con la muestra y el agua	926,3	g
	Temperatura	21	°C

Fuente: Autores, 2017

$$D_s = 0,9975 \left[\frac{491,8g}{690g + 500g - 926,3g} \right]$$

$$D_s = 1,86g/cm^3$$

La densidad aparente seca del agregado fino es de 1,86 g/cm³, este valor es necesario para los diseños de concretos por el método gráfico

$$\% \text{ Absorción} = \left[\frac{500g - 491,8g}{491,8g} \right]$$

$$\% \text{ Absorción} = 1,67\%$$

El % de absorción del agregado fino es de 1,67%. Este dato al igual que la densidad son valores de partida para el diseño de mezcla.

7.1.5.4. *Granulometría del agregado fino.* Para determinar la granulometría del agregado fino se recurre la NTC 1522, tal como el ítem 7.1.3.4. “Granulometría del agregado Natural” pero con tamices de diferentes tamaños en la figura 13 están los tamices utilizados (N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200).

Figura 13 Tamices para agregado fino



Fuente: Autores, 2017

Además, se realizaron las mismas correcciones por pérdida de material en el tamizado.

Tabla 26 Granulometría del Agregado Fino

Tamiz		Peso Retenido Gramos	Retenido Corregido	Retenido	Retenido Acumulado	Pasa
mm	in	g	g	%	%	%
4,75	N°4	42	42,60	4,3	4,26	95,7
2,36	N°8	80	81,14	8,1	12,37	87,6
1,18	N°16	204	206,90	20,7	33,06	66,9
0,6	N°30	314	318,46	31,8	64,91	35,1
0,3	N°50	236	239,35	23,9	88,84	11,2
0,15	N°100	86	87,22	8,7	97,57	2,4
0,075	N°200	20	20,28	2,0	99,59	0,4
Fondo		4	4,06	0,4	100,00	0
Total		986	1000,00	100,0		
Peso inicial		1000				

Fuente: Autores, 2017

La Granulometría debe cumplir con los límites de la tabla 27 de la NTC 174 para determinar si el material es bien gradado o mal gradado.

Tabla 27 Norma Icontec NTC 174 para Agregado Fino

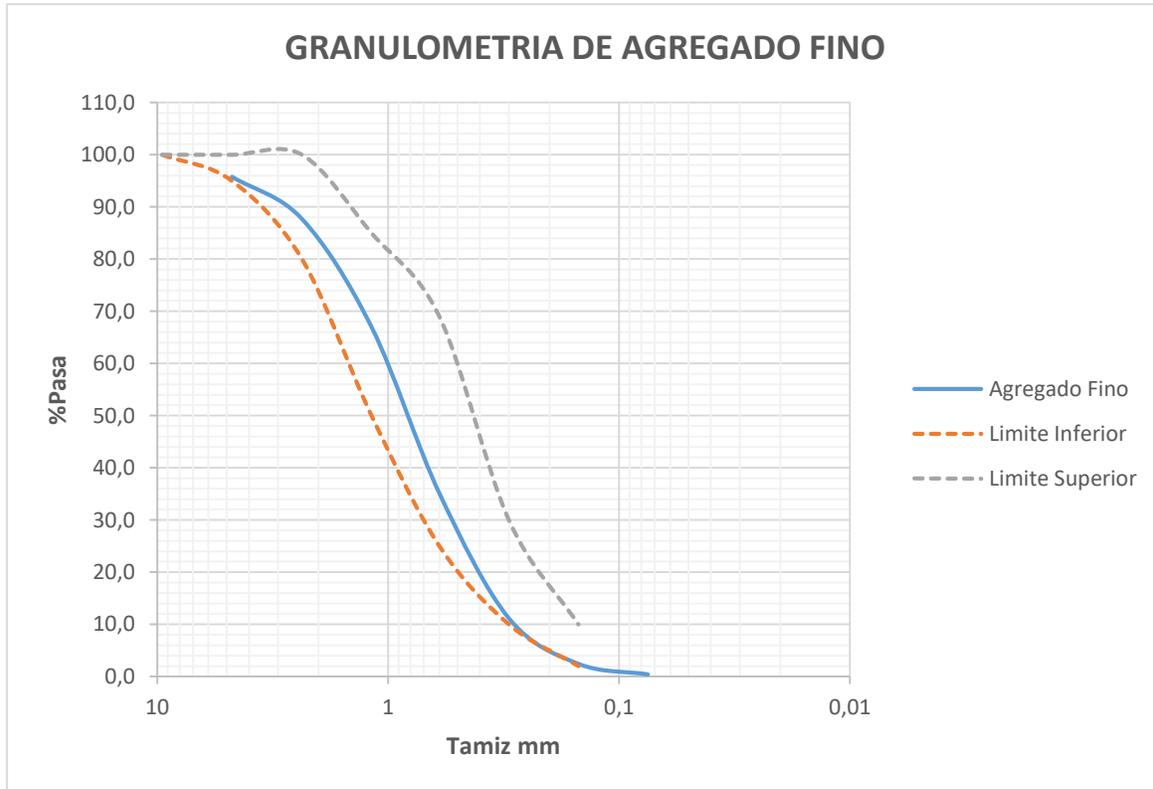
Norma Icontec NTC 174			
in.	mm	Límite Superior	Límite inferior
3/8	9,51	100	100
N°4	4,75	100	95
N°8	2,36	100	80
N°16	1,18	85	50
N°30	0,6	69	25
N°50	0,3	30	10
N°100	0,15	10	2

Fuente: Icontec, NTC 174, 2008⁵⁵

⁵⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Op. Cit, p. 8

Se graficó el % pasa vs Tamiz en mm para determinar si la gradación del material cumple con los límites.

Figura 14 Granulometría Agregado Fino %pasa vs Tamiz mm



Fuente: Autores, 2017

En la gráfica ilustrada en la figura 14, se puede observar que el agregado fino cumple con los límites de gradación de la NTC 174 para finos, esto se da porque es una grava de río y por lo tanto es un material manufacturado y libre de material orgánico.

El análisis granulométrico del agregado fino se complementa calculando su módulo de finura que es igual a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada una de las mallas de la serie estándar. se considera que el agregado fino presenta un módulo de finura de 3,01 adecuado

para la fabricación de concreto, debido a que entra en los rangos ideales que están entre 2,8 y 3,5.

7.1.6. Morteros

7.1.6.1. *Resistencia de cubos de morteros.* Para la resistencia de cubos de morteros, es necesario recurrir a la NTC 121 donde están especificadas las resistencias de los morteros en diferentes días (3, 7, 14 y 28 días).

Los cubos de morteros tienen una medida de 5cm x 5cm x 5cm como lo muestra la figura 15. A los cubos de morteros se le hizo un curado al ambiente.

Figura 15 Mortero con Ceniza después de la falla a Compresión



Fuente: Autores, 2017

La tabla 28 muestra los promedios de los cubos de resistencias a diferentes edades, para un mortero convencional y uno con un 20% de adición de ceniza volante.

Tabla 28 Promedio de Resistencias de diferencias días

Cubos de Morteros		
Día	Sin Ceniza	Con Ceniza
	Resistencia MPa	Resistencia MPa
3	8,83	8,59
7	14,99	15,57
14	15,94	16,16
28	18,32	16,91

Fuente: Autores, 2017

Según los datos obtenidos, las resistencias de los cubos a edades de 3, 7 y 14 días cumple con la norma NTC 121 pero a edades de 28 días no cumple con la resistencia de 24 MPa que indica la norma, esto se puede deber a errores a la hora de la compactar los cubos de morteros, también a que la ceniza volante utilizada, no trabaja adecuadamente cuando se realiza una activación con agua y probablemente, requiera de activadores alcalinos para lograr mejores resultados. Otra razón puede ser que hizo falta un curado en agua para poder obtener mejores comportamientos.

7.2. FASE 2: PROPUESTA DEL DISEÑO DE MEZCLA PARA CILINDROS DE CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO

Para esta fase, es importante realizar un diseño adecuado de la mezcla de concreto para las diferentes proporciones escogidas de agregado reciclado (0%, 25%, 50%, 75%, 100%). Esto, con el objetivo de determinar qué porcentaje es el que ofrece mayor resistencia a la compresión en comparación con un concreto 100% con agregado natural y finalmente, adicionarle el porcentaje de ceniza volante escogido en el ítem 7.1.6.1. “Resistencia de cubos de mortero” al porcentaje que se encuentre como el óptimo.

A continuación, se describe el procedimiento de diseño de mezcla de concreto, para fundir cilindros de prueba, procedimiento descrito en el libro de Diego Sánchez de Guzmán.

7.2.1. Selección del asentamiento

Se selecciona un asentamiento de 75mm, dado que el sistema de compactación y colocación es manual.

7.2.2. Selección del tamaño máximo del agregado

Para todos los diseños de mezcla, se seleccionó un tamaño máximo de 1” y un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ”.

7.2.3. Estimación del contenido de aire

Se estima un porcentaje de aire naturalmente atrapado, de 2% para todos los diseños.

7.2.4. Estimación del contenido de agua de mezclado

Para el concreto convencional (sin agregado reciclado) se estimó un contenido de agua de 172 Kg/m³, mientras que, para el concreto con agregado reciclado, se estimó un contenido de agua de 188 Kg/m³.

7.2.5. Determinación de la resistencia de diseño

Se determinó una resistencia de diseño de 365kg/cm², dado que 28MPa corresponde a 280 kg/cm² y eso está en el rango entre 210 y 350 kg/cm² y se aplica la fórmula de la tabla 29, del libro “Tecnología del concreto y del mortero de Sánchez de Guzmán”.

Tabla 29 Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar

Resistencia especifica $f'c$ (kg/cm ²)	Resistencia de diseño de la mezcla $f'cr$ (kg/cm ²)
menos de 210 kg/cm ²	$f'c + 70$ kg/cm ²
de 210 kg/cm ² a 350 kg/cm ²	$f'c + 85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f'c + 100$ kg/cm ²

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero, 1996⁵⁶

7.2.6. Selección de la relación Agua-cemento

Para este paso, se estableció una relación agua-cemento fija de 0,5 para todos los diseños de mezcla que se hicieron.

⁵⁶ SÁNCHEZ DE GUZMÁN. Op. Cit, p. 237

7.2.7. Estimación del contenido de cemento

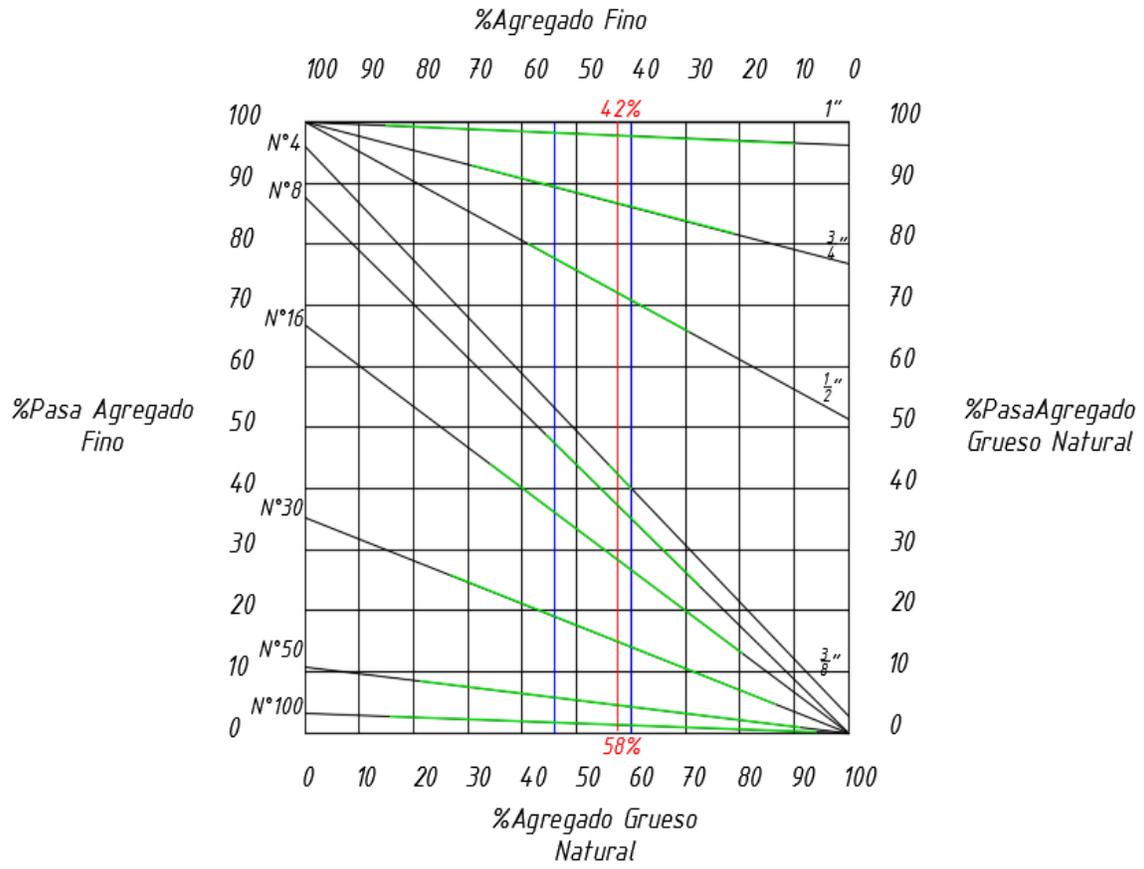
Para un concreto 100% con agregado natural, se estima un contenido de cemento de 344 kg/m^3 y para un concreto con agregado reciclado, se estimó un contenido de cemento de 376 kg/m^3 .

7.2.8. Proporción de agregado

Teniendo en cuenta las curvas granulométricas de los agregados, en las cuales se nota que no se cumple con los límites establecidos por la norma NTC 174, se realiza el análisis granulométrico por el método gráfico, para determinar las proporciones de los agregados.

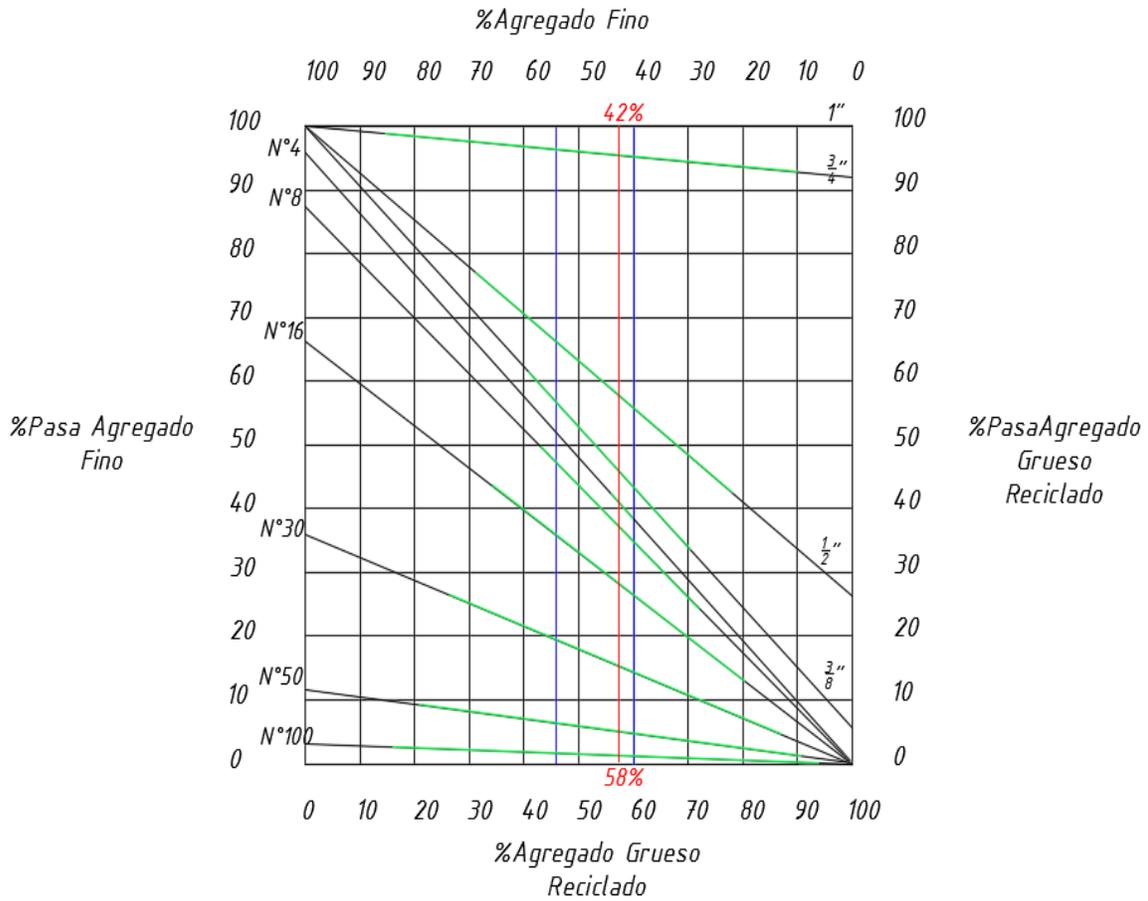
En las siguientes gráficas, se puede observar que para el agregado natural como para el agregado reciclado, se obtuvo la misma proporción por el método gráfico.

Figura 16 Proporción con agregado natural



Fuente: Autores, 2017

Figura 17 Proporción agregado reciclado



Fuente: Autores, 2017

7.2.9. Corrección por humedad de los agregados

Luego de tener el cálculo de los pesos secos de los agregados y los pesos, del agua y del cemento, se realiza una corrección por humedad de los agregados, dado que no se encuentran totalmente secos a la hora de realizar la mezcla.

Se hicieron mezclas en tres días distintos, un día se realizó mezcla de concreto con agregado natural, otro día, se realizó la mezcla para las diferentes sustituciones de agregado reciclado (25%, 50%, 75% y 100%) y, por último, se realizó la mezcla para el porcentaje de sustitución óptimo con adición de ceniza

volante. Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvieron tres humedades distintas para los agregados.

En las siguientes tablas 30 hasta la tabla 34, se muestra el procedimiento para realizar la corrección por humedad de los agregados.

En la siguiente tabla 30, se muestra la humedad natural que se obtuvo en los tres días en que se realizó mezcla de concreto.

Tabla 30 Humedad natural para los tres días que se realizó la mezcla

Tipo de mezcla	Humedad natural (%)		
	Agr. Fino	Agr. Grueso	Agr. Grueso reciclado
Mezcla agregado natural	0,81	2,21	-
50% agregado reciclado	7,41	0,75	1,29
Mezcla % óptimo	6,04	0,97	2,69

Fuente: Autores, 2017

En la siguiente tabla 31, se muestran los porcentajes de absorción de cada agregado, obtenidos en el ítem 7.1.

Tabla 31 % Absorción de cada agregado

Absorción (%)		
Agr. Fino	Agr. Grueso	Agr. Grueso reciclado
1,67	2,56	5,49

Fuente: Autores, 2017

En la siguiente tabla 32, se muestran los pesos secos obtenidos de los agregados en cada diseño de mezcla.

Tabla 32 Peso seco para cada diseño

Tipo de mezcla	Peso seco (Kg/m ³)		
	Agr. Fino	Agr. Grueso	Agr. Grueso reciclado
Mezcla agregado natural	633	915	-
25% agregado reciclado	609	660	206
50% agregado reciclado	609	440	412
75% agregado reciclado	609	220	618
100% agregado reciclado	609	0	824

Fuente: Autores, 2017

En la siguiente tabla 33, se muestra la corrección de la cantidad de agua, por humedad de los agregados, el signo negativo en la cantidad de agua, indican que el porcentaje de absorción de los agregados, es mayor que su humedad natural, por lo tanto, el agua que se requiere para el diseño, es menor que el agua de mezclado inicialmente calculada.

Tabla 33 Corrección de la cantidad de agua por humedad de los agregados

Tipo de mezcla	Aa (kg/m ³)	Agua de mezclado (Kg/m ³)	Agua diseño (Kg/m ³)
Mezcla agregado natural	8,67	172	181
25% agregado reciclado	-14,34	188	174
50% agregado reciclado	-9,69	188	178
75% agregado reciclado	-5,04	188	183
100% agregado reciclado	-0,38	188	188

Fuente: Autores, 2017

En la siguiente tabla 34, se relaciona el peso húmedo de los agregados. Este peso, es el que será utilizado en el diseño de mezcla.

Tabla 34 Peso húmedo de los agregados

Tipo de mezcla	Peso húmedo (Kg/m ³)		
	Agr. Fino	Agr. Grueso	Agr. Grueso reciclado
Mezcla agregado natural	638	935	-
25% agregado reciclado	654	665	209
50% agregado reciclado	654	443	417
75% agregado reciclado	654	222	626
100% agregado reciclado	654	0	835

Fuente: Autores, 2017

7.2.10. Dosificación de materiales con pesos secos

En las siguientes tablas, se muestran, para cada porcentaje de sustitución, los pesos secos y volúmenes absolutos que se requieren por metro cúbico de concreto.

Tabla 35 Diseño concreto sin agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m ³)	Peso específico (g/cm ³)	Volumen absoluto (l/m ³)
Cemento	344	2,887	119
Agua	172	1	172
Aire	0	0	0
Agregado fino	633	1,86	340
Agregado grueso	915	2,48	369
Total	2064		1000

Fuente: Autores, 2017

Tabla 36 Diseño 25% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso específico (g/cm³)	Volumen absoluto (l/m³)
Cemento	376	2,887	130
Agua	188	1	188
Aire	0	0	0
Agregado fino	609	1,86	327
Agregado grueso nat.	660	2,48	266
Agregado grueso rec.	206	2,32	89
Total	2039		1000

Fuente: Autores, 2017

Tabla 37 Diseño 50% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso específico (g/cm³)	Volumen absoluto (l/m³)
Cemento	376	2,887	130
Agua	188	1	188
Aire	0	0	0
Agregado fino	609	1,86	327
Agregado grueso nat.	440	2,48	177
Agregado grueso rec.	412	2,32	177
Total	2025		1000

Fuente: Autores, 2017

Tabla 38 Diseño 75% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso específico (g/cm³)	Volumen absoluto (l/m³)
Cemento	376	2,887	130
Agua	188	1	188
Aire	0	0	0
Agregado fino	609	1,86	327
Agregado grueso nat.	220	2,48	89
Agregado grueso rec.	618	2,32	266
Total	2011		1000

Fuente: Autores, 2017

Tabla 39 Diseño 100% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso específico (g/cm³)	Volumen absoluto (l/m³)
Cemento	376	2,887	130
Agua	188	1	188
Aire	0	0	0
Agregado fino	609	1,86	327
Agregado grueso rec.	824	2,32	355
Total	1997		1000

Fuente: Autores, 2017

En estas tablas 39 - 40, se puede notar que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de agregado natural por agregado reciclado, el peso total de los materiales requeridos para un metro cúbico de concreto es menor, esto debido a que el agregado reciclado es menos denso que el agregado natural.

7.2.11. Diseño definitivo

En las siguientes tablas, se relacionan los pesos secos, húmedos y el peso requerido para fundir 9 cilindros de concreto, aplicada ya la corrección por humedad de los agregados.

Tabla 40 Diseño definitivo sin agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,01413m³ (Kg)
Cemento	344	344	4,863
Agua	172	181	2,554
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	633	638	9,021
Agregado grueso	915	935	13,220
Total	2064	2098	29,658

Fuente: Autores, 2017

Tabla 41 Diseño definitivo 25% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,01413m³ (Kg)
Cemento	376	376	5,316
Agua	188	174	2,455
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	609	654	9,244
Agregado grueso nat.	660	665	9,400
Agregado grueso rec.	206	209	2,950
Total	2039	2077	29,365

Fuente: Autores, 2017

Tabla 42 Diseño definitivo 50% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,01413m³ (Kg)
Cemento	376	376	5,316
Agua	188	178	2,521
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	609	654	9,244
Agregado grueso nat.	440	443	6,267
Agregado grueso rec.	412	417	5,901
Total	2025	2069	29,248

Fuente: Autores, 2017

Tabla 43 Diseño definitivo 75% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,01413m³ (Kg)
Cemento	376	376	5,316
Agua	188	183	2,587
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	609	654	9,244
Agregado grueso nat.	220	222	3,133
Agregado grueso rec.	618	626	8,851
Total	2011	2061	29,131

Fuente: Autores, 2017

Tabla 44 Diseño definitivo 100% agregado reciclado

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,01413m³ (Kg)
Cemento	376	376	5,316
Agua	188	188	2,652
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	609	654	9,244
Agregado grueso rec.	824	835	11,802
Total	1997	2052	29,014

Fuente: Autores, 2017

Con estos pesos obtenidos, se fundieron los cilindros de concreto para cada porcentaje de sustitución como la figura 18 y se sumergieron en la pileta de agua como lo muestra la figura 19, para ser fallados a los 7, 14 y 28 días de curado.

Figura 18 Cilindros Fundidos



Fuente: Autores, 2017

Figura 19 Cilindros sumergidos en la pileta



Fuente: Autores, 2017

7.3. FASE 3: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO CON DIFERENTES PROPORCIONES DE AGREGADO RECICLADO

En esta fase de la investigación, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión de cilindros de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de agregado natural por agregado reciclado (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) y para diferentes edades de curado (7, 14 y 28 días).

Se fundieron nueve cilindros por cada porcentaje de sustitución, para fallar tres en cada edad de curado y realizar un promedio aritmético de estos valores. En la siguiente tabla 45, se relacionan los valores obtenidos para cada porcentaje de sustitución, en cada edad de curado.

Tabla 45 Resistencia a la compresión cilindros de concreto

% de sustitución	Resistencia a la compresión MPa			
	7 días	14 días	28 días	Imagen
0%	20,0	26,2	32,7	
25%	18,4	20,9	35,7	
50%	13,5	21,7	26,5	
75%	5,7	16,4	24,1	
100%	9,5	14,5	20,4	

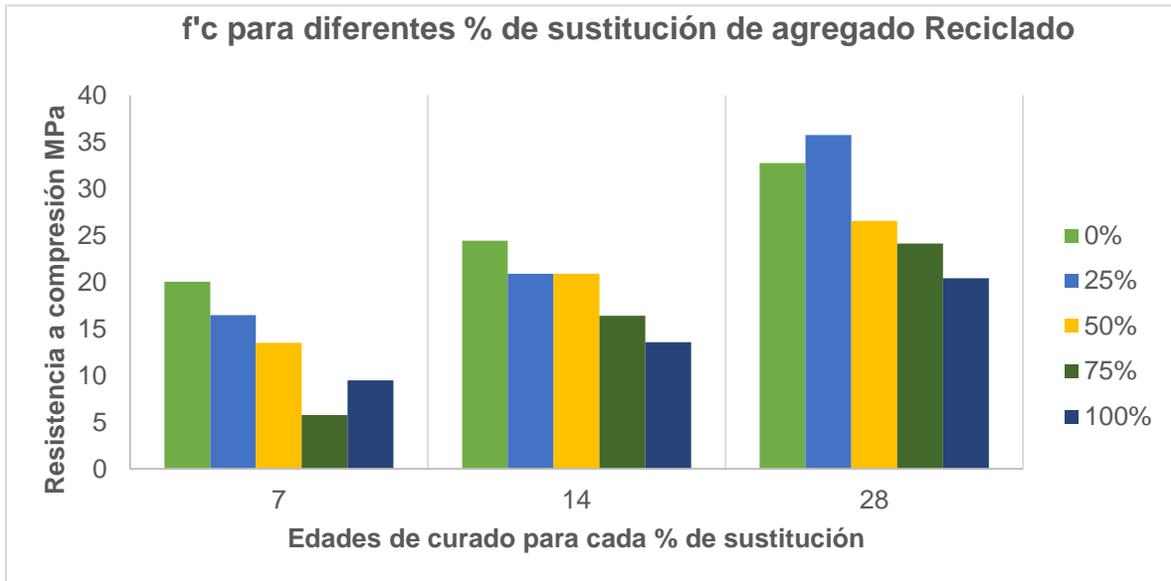
Fuente: Autores, 2017

De los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, se pudo notar que el porcentaje que presentó las mayores resistencias fue el 25%, obteniendo valores por encima de los 28 MPa., e incluso por encima del concreto con 0% de agregado reciclado, es decir el concreto convencional. Esto indica que el 25% es un porcentaje de sustitución óptimo, con el que se obtienen resistencias similares y en este caso superiores a las de un concreto convencional.

Además de obtener un porcentaje óptimo, se pudo ver que hasta en un porcentaje de sustitución del 50%, se obtienen resistencias cercanas a los 28 MPa, lo que es un índice del rango en el que se podrían trabajar los concretos con agregado reciclado. También se pudo notar, que, en el porcentaje óptimo, se obtuvieron resistencias mayores a las del concreto convencional, entre los 14 y 28 días de curado, esto significa que la resistencia para este porcentaje aumenta en mayor grado a edades superiores a los 14 días.

De los resultados obtenidos, se pudo realizar una gráfica de barras que muestra el incremento de las resistencias a la compresión de los cilindros para los cinco porcentajes utilizados en la investigación en las tres edades de curados analizados (7, 14 y 28 días).

Figura 20 Resistencia a la compresión de los 5 porcentajes de sustitución



Fuente: Autores, 2017

En la figura 20, se puede notar lo mencionado anteriormente, que para 7 y 14 días, el concreto convencional presenta mayor resistencia y que para los 28 días el 25% es el porcentaje que obtuvo mayor resistencia.

7.4. FASE 4: DISEÑO DE MEZCLA Y ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y A LA FLEXIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN ÓPTIMO CON UNA ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE

Teniendo estos datos, sabiendo que el porcentaje óptimo fue el 25%, se realiza un nuevo diseño para este porcentaje de sustitución y a este se le adiciona la ceniza volante para verificar el comportamiento de estos dos materiales juntos en una mezcla de concreto. El diseño se realizó para cilindros, que serán utilizados en el ensayo de resistencia a la compresión y para viguetas que se utilizarán para encontrar la resistencia a la flexión del concreto.

7.4.1. Diseño de mezcla porcentaje de sustitución óptimo

Para este diseño, se utilizó el mismo procedimiento de diseño, descrito en el ítem 7.2., por lo tanto, a continuación, se presenta la tabla 46 con la dosificación de los materiales.

Tabla 46 Peso seco y volumen absoluto diseño óptimo

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso específico (g/cm³)	Volumen absoluto (l/m³)
Cemento	300,8	2,887	104
Ceniza volante	75,2	1,992	38
Agua	188	1	188
Aire	0	0	0
Agregado fino	598	1,86	322
Agregado grueso nat.	649	2,48	261
Agregado grueso rec.	203	2,32	87
Total	2013		1000

Fuente: Autores, 2017

Teniendo estos datos, se hace la corrección por humedad de los agregados, teniendo en cuenta la humedad natural y absorción de los agregados, descritas en las tablas 30 y 31 respectivamente.

Con estas correcciones, se obtiene la cantidad de agua para el diseño, el sobrante o faltante de agua y se obtienen los pesos húmedos de los agregados, como se relaciona en las siguientes tablas.

Tabla 47 Agua de diseño y sobrante o faltante de agua

Aa (kg/m³)	Agua de mezclado (Kg/m³)	Agua diseño (Kg/m³)
-10,18	188	178

Fuente: Autores, 2017

Tabla 48 Peso húmedo agregados

Peso húmedo (Kg/m³)		
Agr. Fino	Agr. Grueso	Agr. Grueso reciclado
635	655	208

Fuente: Autores, 2017

Con los datos de peso húmedo y del agua requerida para el diseño, se realiza la dosificación de los materiales para nueve cilindros y para tres viguetas de concreto, como se relaciona en la siguiente tabla 49.

Tabla 49 Dosificación materiales para cilindros y viguetas

Materiales	Peso seco (Kg/m³)	Peso húmedo (Kg/m³)	Peso húmedo para 0,05464 m³ (Kg)
Cemento	301	300,8	16,435
Ceniza volante	75	75,2	4,109
Agua	188	178	9,716
Aire	0	0	0,000
Agregado fino	598	635	34,668
Agregado grueso nat.	649	655	35,782
Agregado grueso rec.	203	208	11,362
Total	2013	2051	112

Fuente: Autores, 2017

7.4.2. Preparación mezcla de concreto para fundir cilindros y viguetas

Luego de tener la dosificación de los materiales para realizar el diseño de mezcla, se procede a realizar la mezcla y la posterior fundida de los cilindros y las viguetas de concreto con el porcentaje de sustitución óptimo y la adición de ceniza volante.

Figura 21 Cilindros porcentaje óptimo y ceniza volante



Fuente: Autores, 2017

Figura 22 Viguetas porcentaje óptimo y ceniza volante



Fuente: Autores, 2017

Luego de tener fundidos los cilindros y las viguetas, se sumergieron en la pileta de agua para realizar el curado de las muestras de concreto, como se ve en la siguiente ilustración.

Figura 23 Muestras sumergidas en la pileta



Fuente: Autores, 2017

7.4.3. Ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión del concreto con porcentaje de sustitución óptimo y adición de ceniza volante

Luego de haber fundido los cilindros y haberlos sumergido en la pileta para u curado, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días de curado y ensayos de flexión en viguetas para 28 días de curado, con lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 50 Resistencia a la compresión % óptimo con adición de ceniza volante

Resistencia a la compresión % óptimo MPa.			
Edad de curado	7 días	14 días	28 días
Resistencia	6,2	11,3	15,0
Imagen			

Fuente: Autores, 2017

De estos resultados se pudo comprobar que la resistencia a la compresión del concreto se redujo notablemente con la adición de ceniza volante, llegando a alcanzar valores muy por debajo de los 28 MPa que era la resistencia del diseño, esto se puede deber a que estos dos materiales, la ceniza volante no trabajan bien juntos o que esta ceniza no aporta características importantes al concreto en términos de comportamiento mecánico.

En la siguiente tabla 51, se describen las resistencias a la flexión teóricas que deberían tener las mezclas de concreto, esto, teniendo en cuenta que dicha resistencia debe estar entre el 10% y el 20% de la resistencia a la compresión.

Tabla 51 Resistencia a la flexión teórica

Resistencia a la flexión (MPa)			
Tipo de mezcla	0,1 f'c	0,15 f'c	0,2 f'c
% óptimo sin ceniza	3,5	5,3	7,0
% óptimo + ceniza	1,5	2,2	3,0

Fuente: Autores, 2017

Los resultados obtenidos para resistencia a la flexión o módulo de rotura para el porcentaje óptimo con adición de ceniza, se relacionan en la siguiente tabla 52.

Tabla 52 Resistencia a la flexión obtenida

Resistencia obtenida (MPa)
5,5
1,8

Fuente: Autores, 2017

Con estos resultados, se pudo notar que la mezcla de concreto, realizada con una adición del 20% ceniza volante, redujo considerablemente su comportamiento mecánico, en comparación con el concreto sin adición de ceniza, aunque ambos resultados, están dentro del rango de entre 10% y 20% de la resistencia a la compresión, el concreto con ceniza volante, no obtuvo ni siquiera la mitad de la resistencia del porcentaje de sustitución óptimo, esto indica que esta ceniza no trabaja muy bien con agregados reciclados o que no trabaja muy bien en presencia de agua, por lo que probablemente se requiera de activadores alcalinos.

8. CONCLUSIONES

De los ensayos de caracterización física y mecánica de los materiales, se pudo determinar que el porcentaje de absorción de los agregados reciclados, efectivamente es mayor al de los agregados naturales, esto debido al mortero adherido a las partículas del agregado. Además de eso, en relación con la ceniza volante, al tener menor densidad que el cemento, hace que las mezclas de concreto o de mortero, sean más livianas; sin embargo, no se obtuvieron resultados satisfactorios de resistencia a la compresión para morteros con adición de ceniza volante.

De los diseños de mezcla propuestos para cada porcentaje de sustitución, se pudo notar que a medida que se aumentaba este porcentaje de reemplazo, se disminuía el peso total de la mezcla, factor que es importante porque generalmente se busca que las estructuras sean lo más livianas posible y con este material, se logra disminuir el peso de la mezcla de concreto. También, se pudo notar que a medida que el porcentaje de sustitución aumentaba, también aumentaba la cantidad de agua requerida para la mezcla, esto sucede porque al aumentar el porcentaje de agregado reciclado, también se estaba aumentando la capacidad de absorción de la mezcla.

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, fueron satisfactorios, dado que se superó la resistencia de diseño en el concreto sin agregado reciclado, además se pudo obtener un porcentaje de sustitución óptimo, que fueron los cilindros que mayor resistencia a la compresión adquirieron, de todos los porcentajes analizados. También se pudo establecer un rango de porcentajes de sustitución con los cuales, se pueden obtener resistencias a la compresión similares e incluso superiores a las de un concreto convencional.

Con respecto al diseño de mezcla que se realizó con el porcentaje de sustitución óptimo y con adición del 20% de ceniza volante, los resultados no fueron los esperados, dado que no se alcanzaron resistencias a la compresión ni a la flexión cercanas a las de un concreto convencional, por el contrario, estas resistencias disminuyeron notablemente. Esto se traduce en que la ceniza volante no se comporta bien en concretos con agregado reciclado, o simplemente no aporta resistencia a estos o que se requiere de algún tipo de aditivos o activadores alcalinos que permitan que la ceniza volante reaccione de mejor manera.

Por último, se puede decir que en el concreto con porcentajes de sustitución entre el 25% y el 50%, se obtienen resistencias similares o superiores en comparación con un concreto convencional. Por otro lado, para concretos con porcentajes de sustitución mayores al 50%, no se obtienen resistencias tan altas. Dicho esto, es importante destacar que al encontrar un porcentaje de sustitución óptimo, es decir que lograra alcanzar una resistencia superior o cercana a la de un concreto convencional, como lo fue el 25%, se logró el objetivo de la investigación, que era encontrar un porcentaje de sustitución con el que se puedan desarrollar concretos de altas resistencias y obtener resultados similares a los obtenidos en mezclas de concreto con agregados 100% naturales.

9. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el aumento del porcentaje de sustitución de agregado natural, por agregado reciclado, afecta notablemente las propiedades mecánicas del concreto, se recomienda, utilizar porcentajes superiores al 50% sólo para obras o elementos de bajas especificaciones técnicas, que no requieran concretos de altas resistencias, mientras que en el caso del rango entre 25% y 50% sí se pueden implementar en elementos de tipo estructural y con mayores requerimientos de comportamiento mecánico.

Se recomienda no utilizar la ceniza volante en concretos con agregado reciclado, o realizar ensayos con activación alcalina del material para que este se comporte mejor junto con los demás materiales del concreto.

Se recomienda realizar un curado en inmersión en agua de los cubos de mortero, para obtener mejores resultados de resistencia a la compresión.

BIBLIOGRAFÍA

ADAM, Huberts et al. Hormigón. Barcelona. Editorial Gustavo Gili, 2007.

ASOCRETO. Tecnología y Propiedades. Quinta Edición. Instituto del Concreto Asocreto, 2002, Vol. 1.

DAMA. Guía técnica para el manejo de escombros de la construcción. Santa Fe de Bogotá, DAMA 2000.

FARNY, James. Diseño y Construcción de pisos en Concreto. Tercera Edición. Traducido por Asocreto Bogotá. Asocreto, 2013.

GERE, James. Mecánica de Materiales. Séptima edición Javier León Cárdenas Ciudad de México. Editorial CENGAGE learning, 2009.

HIBBELER, Russell. Mecánica de Materiales. Octava edición. Jesus Elmer Murrieta Ciudad de México. Editorial Pearson, 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO (ICPC). Normas Técnicas Colombianas sobre Hormigón Cemento Acero de Refuerzo y Agregados. Icontec, 1976.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Especificaciones Técnicas Para Los Concretos A La Vista De Cemento Blanco. Betocib, 1994.

NILSON, Arthur. Diseño de Estructuras de Concreto. Duodécima edición. Luis Eduardo Yamín en Bogotá. Mc Graw Hill, 1999.

PARADA, Orlando. GÓMEZ, Oscar. Gestión ambiental de residuos de construcción y demolición- escombros. Editorial Académica Española, 2012.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Quinta Edición. Bhandar Editores LTDA, 2001.

SEGURA, Jorge. Estructuras de Concreto I. Cuarta Edición. Universidad Nacional De Colombia, 1999.

VASQUES PANIAGUA, E. (2007). CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO CON ELEVADO CONSUMO DE CENIZA VOLANTE. Tesis maestría en ingeniería. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LORENZO GARCIA, P. (1993). INFLUENCIA DE DOS TIPOS DE CENIZAS VOLANTES ESPAÑOLAS EN LA MICROESTRUCTURA Y DURABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO PORTLAND HIDRATADO. Tesis doctor en ciencias químicas. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.