

**APROVECHAMIENTO DE ESCOMBROS COMO AGREGADOS NO  
CONVENCIONALES EN MEZCLAS DE CONCRETO**

**JUAN SEBASTIAN FERREIRA DIAZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2009**

**APROVECHAMIENTO DE ESCOMBROS COMO AGREGADOS NO  
CONVENCIONALES EN MEZCLAS DE CONCRETO**

**JUAN SEBASTIAN FERREIRA DIAZ**

**Tesis de grado como requisito para optar  
al título de Ingeniero Civil**

**Director:  
MARIA FERNANDA SERRANO GUZMÁN  
PhD. Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2009**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga, Octubre de 2009.

## **DEDICATORIAS**

Este trabajo lo dedico en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de vivir, por darme la salud y sabiduría necesaria para culminar mi carrera y mi tesis de grado.

Lo dedico a mis padres y hermanos, porque fueron ellos los que siempre estuvieron a mi lado, cuidándome y apoyándome incondicionalmente en los buenos y malos momentos. Los quiero con todo mi corazón y este trabajo que me llevó 1 año hacerlo es para ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Han sido años de esfuerzos y dedicaciones, días y noches de estudio para llegar con éxito al final de la vida universitaria. Son muchas las personas que me han apoyado directa o indirectamente en este largo proceso. El trabajo que aquí se presenta, es el resultado de seis meses de trabajo, esfuerzos individuales y colectivos para obtener los resultados que se presentan a continuación.

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por haberme permitido lograr un sueño tan anhelado, por haberme permitido culminar mis estudios y mi proyecto de grado. A mi Directora, la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán, por todo el tiempo que me ha brindado, por sus aportes con ideas y recomendaciones para el desarrollo y culminación de este trabajo, por su amistad y por su inmenso respaldo desde el inicio hasta final. A la Universidad Pontificia Bolivariana por contribuir a mi formación tanto profesional como personal.

Un agradecimiento muy especial a mis padres, Martha y Fernando, por su apoyo incondicional; a mis hermanos, Alejandro y Carlos, y a toda mi familia que ha sido una voz de aliento para no desfallecer en la firme decisión de alcanzar esta meta. A mi novia, por brindarme su cariño, su tiempo, paciencia y colaboración en todo momento.

Agradezco sinceramente a la facultad de Ingeniería Civil, a todos los profesores que hacen parte de ella y a los que no, también les doy las gracias, por compartir sus conocimientos y orientaciones a lo largo de la carrera. A las personas encargadas de los laboratorios, Don Heli Rueda y Don Vicente Páez, que con sus orientaciones me ayudaron a culminar con éxito los trabajos que allí se realizaron. Todos estos trabajos de laboratorio no hubieran sido posibles sin la ayuda del señor Enrique Suarez, a él mis más sinceros agradecimientos.

## TABLA DE CONTENIDO

	PÁG
1.	INTRODUCCIÓN ..... 1
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 1
1.2.	ALCANCE ..... 3
1.3.	JUSTIFICACIÓN ..... 3
1.4.	OBJETIVOS ..... 4
1.4.1.	Objetivo General. .... 4
1.4.2.	Objetivos Específicos..... 4
1.5.	RELEVANCIA DEL ESTUDIO ..... 4
1.6.	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS..... 5
2.	MARCO TEÓRICO ..... 6
2.1.	TEORIA GENERAL DEL CONCRETO ..... 6
2.1.1.	Concreto ..... 6
2.1.2.	Cemento ..... 7
2.1.3.	Agua..... 11
2.1.4.	Agregados..... 12
2.1.5.	Aire..... 19
2.1.6.	Aditivos ..... 19
2.2.	PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO ..... 20
2.2.1.	Manejabilidad..... 20
2.2.2.	Segregación..... 22
2.2.3.	Exudación o sangrado ..... 22
2.2.4.	Masa unitaria y rendimiento volumétrico..... 22
2.2.5.	Contenido de aire..... 22
2.2.6.	Contenido de agua..... 23
2.3.	PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO..... 23
2.3.1.	Resistencia ..... 23
2.4.	TEORÍA GENERAL DE RESIDUOS ..... 25
2.4.1.	Residuo sólido ..... 25
2.4.2.	Residuo peligroso ..... 27
2.4.3.	Escombros ..... 27
2.5.	PRINCIPALES ACTIVIDADES GENERADORAS DE ESCOMBROS EN LA CONSTRUCCIÓN Y/O REMODELACIÓN DE EDIFICACIONES Y DEMAS INSTALACIONES SIMILARES ..... 27
2.5.1.	Preliminares..... 28
2.5.2.	Construcción de estructuras ..... 29
2.5.3.	Limpieza en áreas de trabajo..... 30
2.6.	MARCO LEGAL ..... 30
3.	METODOLOGÍA ..... 34
3.1.	VISITA INFORMATIVA A LA AUTORIDAD AMBIENTAL COMPETENTE ..... 35

3.2.	VISITA DE RECONOCIMIENTO A LA ESCOMBRERA AUTORIZADA.....	35
3.3.	REVISIÓN DE LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL.....	36
3.4.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE ESCOMBROS.....	36
3.5.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES .....	37
3.5.1.	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos .....	38
3.5.2.	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en agregados gruesos y finos.....	39
3.5.3.	Contenido aproximado de materia orgánica en agregados finos .....	40
3.5.4.	Gravedad específica y absorción de agregados .....	41
3.5.5.	Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles.....	43
3.5.6.	Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregados gruesos .....	44
3.5.7.	Humedad natural de agregados gruesos y finos.....	44
3.5.8.	Densidad del cemento .....	45
3.6.	DISEÑO DE LA MEZCLA .....	47
3.6.1.	Selección del asentamiento .....	47
3.6.2.	Selección del tamaño máximo nominal.....	47
3.6.3.	Estimación del contenido de agua de mezclado .....	48
3.6.4.	Cálculo del contenido de cemento .....	48
3.6.5.	Estimación del volumen de agregados .....	49
3.6.6.	Selección del porcentaje adecuado de mezcla.....	50
3.6.7.	Ajuste por humedad .....	50
3.6.8.	Ajuste por asentamiento .....	51
3.7.	DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	52
4.	RESULTADOS.....	53
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL REFERENTE AL TEMA DE MANEJO DE LOS ESCOMBROS EN BUCARAMANGA Y SU AREA METROPOLITANA.....	53
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR.....	54
4.2.1.	Densidad del cemento .....	55
4.2.2.	Análisis granulométrico.....	55
4.2.3.	Determinación de la mezcla de agregados con el menor porcentaje de vacíos.....	59
4.3.	RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	60
4.4.	RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	62
5.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	65
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL REFERENTE AL TEMA DE MANEJO DE LOS ESCOMBROS EN BUCARAMANGA Y SU AREA METROPOLITANA.....	65
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR.....	66
5.2.1.	Densidad del cemento .....	66

5.2.2.	Análisis granulométrico.....	66
5.2.3.	Determinación de la mezcla de agregados con el menor porcentaje de vacíos.....	69
5.3.	RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	70
5.4.	RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	71
5.4.1.	Comparación de los valores de resistencia máxima a los 7, 14 y 28 días para las distintas condiciones de mezcla .....	76
5.5.	AJUSTE A LAS PROPORCIONES DE LA MEZCLA.....	77
6.	PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS ESCOMBROS.....	79
6.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN.....	79
6.2.	GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN .	80
6.2.1.	Reducción en la generación de escombros .....	81
6.2.2.	Reducción en la generación de escombros .....	81
6.2.3.	Control de escombros durante las actividades preliminares .....	82
6.2.4.	Control de tierra útil proveniente de excavaciones .....	82
6.2.5.	Control de escombros provenientes de estructuras de concreto y mortero y durante actividades de obra gris.....	82
6.2.6.	Control de escombros durante los acabados.....	83
6.2.7.	Control de escombros durante la limpieza en áreas de trabajo .....	83
6.2.8.	Control de aguas residuales y aguas de escorrentía .....	83
6.3.	RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE ESCOMBROS EN OBRA.....	83
7.	CONCLUSIONES .....	85
8.	RECOMENDACIONES.....	88
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	89
	ANEXOS.....	92

## LISTA DE FIGURAS

	<b>PÁG</b>
Figura 1 Etapas del proceso productivo del cemento .....	8
Figura 2 Zonas del horno .....	9
Figura 3 Ensayo de asentamiento .....	21
Figura 4 Tipos de falla de los cilindros de concreto .....	24
Figura 5 Ensayo de flexión con carga en dos puntos.....	25
Figura 6 Actividades en la construcción y/o remodelación de edificaciones....	28
Figura 7 Visita de inspección a la escombrera.....	36
Figura 8 Escombros de mampostería recolectados.....	37
Figura 9 Muestra de escombro grueso .....	38
Figura 10 Proceso de lavado de las muestras .....	39
Figura 11 Escala de vidrios de colores de referencia.....	41
Figura 12 Secado de muestra de agregado fino en el ensayo de gravedad específica y absorción.....	42
Figura 13 Muestra de agregado grueso y carga abrasiva en el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles.....	45
Figura 14 Frasco de Le Chatelier con ACPM.....	46
Figura 15 Pasos que se siguieron para el diseño de la mezcla .....	47
Figura 16 Resistencia a la compresión Vs relaciones A/C.....	49
Figura 17 Elaboración de cilindros de concreto .....	51
Figura 18 Elaboración de la prueba de resistencia a la compresión.....	52
Figura 19 Acomodación de escombros en el sitio de disposición .....	53
Figura 20 Granulometría del agregado grueso .....	57
Figura 21 Granulometría del escombro grueso.....	57
Figura 22 Granulometría del escombro de ladrillo grueso .....	58
Figura 23 Granulometría del agregado fino .....	58
Figura 24 Granulometría del escombro fino.....	59
Figura 25 Granulometría del escombro de ladrillo fino.....	59
Figura 26 Porcentaje de vacíos de las diferentes proporciones de mezcla .....	61
Figura 27 Vía de acceso a la escombrera.....	65
Figura 28 Curvas granulométricas del material grueso.....	68
Figura 29 Curvas granulométricas del material fino.....	68
Figura 30 Propuesta para el tratamiento de escombros .....	80

## LISTA DE TABLAS

	PÁG
Tabla 1 Cambios que ocurren en las zonas del horno.....	10
Tabla 2 Tipos de cemento Portland .....	11
Tabla 3 Clasificación de las partículas según su forma. ....	16
Tabla 4 Clasificación de la textura superficial de los agregados.....	16
Tabla 5 Masa mínima de agregado grueso para el ensayo .....	40
Tabla 6 Tamices empleados para remover los terrones de arcilla y partículas deleznales.....	40
Tabla 7 Cantidad mínima de muestra para el ensayo.....	43
Tabla 8 Granulometrías para la muestra del ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles .....	43
Tabla 9 Carga abrasiva para el ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles.....	44
Tabla 10 Proporciones de mezcla establecidos.....	46
Tabla 11 Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de estructuras .....	48
Tabla 12 Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregados, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido .....	49
Tabla 13 Resultados de los ensayos realizados a los agregados y escombros .....	54
Tabla 14 Densidades promedios del Cemento Diamante .....	55
Tabla 15 Tamaño máximo nominal del agregado, escombros y ladrillo grueso	56
Tabla 16 Módulo de finura obtenido en la arena, escombros y ladrillo fino .....	56
Tabla 17 Proporciones de mezcla que se emplearon para la elaboración de los especímenes de prueba.....	60
Tabla 18 Pruebas del concreto en estado plástico para las Mezclas A, B, C, D y E.....	61
Tabla 19 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de la Mezcla A. ....	62
Tabla 20 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de las Mezclas B y C. .....	63
Tabla 21 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de las Mezclas D y E. .....	64
Tabla 22 Comparación de escombros gruesos y finos con los agregados convencionales .....	67
Tabla 23 Porcentaje de vacíos obtenidos en las diferentes proporciones de mezcla.....	69
Tabla 24 Comparación de mezcla testigo E con mezclas B y C .....	70
Tabla 25 Comparación de mezcla testigo E con mezclas A y D.....	71
Tabla 26 Normas para el control del concreto .....	71
Tabla 27 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla A. ....	72
Tabla 28 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla B. ....	73
Tabla 29 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla C. ....	74
Tabla 30 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla D. ....	75
Tabla 31 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla E. ....	76

Tabla 32 Resultados a compresión de las mezclas que obtuvieron mayor resistencia.....	77
Tabla 33 Cantidad de material para las nuevas mezclas.....	78
Tabla 34 Valor de 1m <sup>3</sup> de concreto elaborado con escombros.....	87
Tabla 35 Valor comercial de 1m <sup>3</sup> de concreto.....	87

## RESUMEN

### **TÍTULO: APROVECHAMIENTO DE ESCOMBROS COMO AGREGADOS NO CONVENCIONALES EN MEZCLAS DE CONCRETO**

**AUTOR(ES):** Juan Sebastián Ferreira Díaz

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** María Fernanda Serrano Guzmán

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, Escombro, Mezcla, Aprovechamiento, Construcción.

Durante este trabajo se desarrolló una metodología que permitió el aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. El material seleccionado estuvo conformado por Arena extraída del río Pescadero; Triturado proveniente de la trituradora La Estrella; Escombros que fueron clasificados como Escombro Grueso ( $E_1$ ), Escombro Fino ( $E_2$ ) y muestras de ladrillo que fueron trituradas manualmente y separadas por el tamiz No.4 (4.75mm) en tamaños finos ( $E_3$ ) y gruesos ( $E_4$ ). Con estos agregados se prepararon 4 tipos de mezclas (A, B, C y D) y una mezcla (E) considerada como testigo.

El diseño de mezcla se basó en la combinación de agregados que arrojara el menor porcentaje de vacíos. Las proporciones seleccionadas tuvieron porcentajes de vacíos que oscilaron entre 28.3 y 31%.

El módulo de finura de los materiales finos, evidenció que los valores de los escombros recuperados, ( $E_2= 2.45$  y  $E_3=2.71$ ), corresponde al módulo de finura para agregados finos o arenas, y es un valor cercano al valor de la arena que se tiene proveniente de río. Respecto al tamaño máximo nominal de los materiales gruesos, el escombro grueso ( $E_1$ ) obtuvo un TMN de 1" (25mm), este valor es similar al del agregado grueso, y el TMN del escombro ( $E_4$ ) fue de 1½" (38.1mm); esto era de esperarse porque el escombro de ladrillo fue triturado manualmente en los laboratorios.

Los resultados del concreto en estado fresco muestran que el peso unitario del concreto tuvo valores que corresponden a mezclas de trabajabilidad buena. Al concreto en estado endurecido, se le realizaron las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y flexión. Los resultados a compresión muestran que la proporción de mezcla A4, fue la que presentó los mayores resultados reportando una resistencia a los 28 días de 223.56 kg/cm<sup>2</sup> frente a 200.68 kg/cm<sup>2</sup> de la mezcla testigo.

## ABSTRACT

**TITLE: USE OF CONSTRUCTION WASTE AS NON-CONVENTIONAL CONCRETE MIXTURES**

**AUTOR (S):** Juan Sebastián Ferreira Díaz

**FACULTY:** Civil Engineering

**DIRECTOR:** María Fernanda Serrano Guzmán

**KEY WORDS:** Concrete, rubble, mixture, achievement, construction.

A methodology to prepare concrete mixtures using non-conventional aggregates has been developed. The selected material consisted of sand taken from the Pescadero River; gravel comes from La Estrella Company, and bricks taken from a building construction. The aggregate has been classified qualitatively as coarse gravel (E1), fine sand (E2) and waste of brick, which were crushed manually and separated by sieve No.4 (4.75mm) in fine sizes (E3) and coarse sizes (E4). Four mixtures were prepared and has been identified as A, B, C and D, and control (E).

The design of the concrete was based on the combination of aggregates to produce the lowest percentage of voids. The selected aggregates proportion showed a void percentage ranging between 28.3 and 31%. Moreover, the workability of mixture with B and C presented a better behavior.

Data for the modulus of fineness (MF) of fine materials, evidence that the values of the recovered material (E2 = 2.45 and E3 = 2.71) seems as MF for fine aggregates and they are close to MF for river sand. On the other hand, the nominal maximum size (NMS) of coarse gravel of E1 was 1" (25mm) and E4 was 1 ½ "(38.1mm).

The workability of the fresh concrete was good. Hardened concrete was tested with mechanical resistance to compression and flexure. Regarding the compression results, it was observed that the proportion corresponding to the mix A4 was the one with the greatest results reporting a resistance at 28 days of 200.68 versus 223.56 kg/cm<sup>2</sup> mixture kg/cm<sup>2</sup> witness.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Hacia mediados de los años noventa en Colombia, el conocimiento que existía tanto en las Universidades como en las empresas del sector de la construcción, sobre la utilización de materiales no convencionales era casi nulo. Hoy, varios años después, hablar de materiales y prácticas de construcción “sostenibles” o “verdes” se está haciendo más cotidiano.

La actividad de la construcción demanda grandes cantidades de materiales para la concepción de todo tipo de obras. Uno de los más utilizados es el concreto, un material compuesto por agregados los cuales ocupan aproximadamente un 80% de su volumen. Los agregados que se utilizan, son obtenidos a partir de la explotación de materiales no renovables en canteras o en ríos. En las áreas de explotación se generan impactos negativos tales como la esterilización de los suelos, contaminación atmosférica por partículas en suspensión y gases emitidos por la maquinaria utilizada para dicho proceso. En las fuentes de aguas superficiales se generan problemas de erosión, sedimentación, reducción del cauce del río y, por consecuencia, el riesgo de inundaciones en las comunidades cercanas es inevitable.

Sin embargo, el impacto de la construcción no solo se evidencia en las áreas de explotación para obtener los materiales. La generación de escombros es significativa y constituyen un amplio porcentaje del total de residuos generados; a pesar de esto, han sido siempre considerados de menor importancia frente a otros residuos como los domiciliarios.

Alrededor de esta serie de antecedentes, existe un interés especial en los procesos de reciclado, no solo por motivos ecológicos sino también económicos originado a partir de una sensibilización creciente por parte de la sociedad actual sobre un crecimiento sostenible, que implica aprovechar al máximo los residuos de los procesos; específicamente de la construcción, reducir los índices de contaminación y en definitiva ser más eficaces en el aprovechamiento de los recursos.

Reciclar los escombros de procesos como la construcción para la producción de agregados ecológicos es una opción pertinente a nivel ambiental, técnico y económico para el sector. Los municipios y empresas del sector privado tienen en los escombros una oportunidad de negocio con sentido social, mediante la construcción de plantas para el aprovechamiento de estos residuos.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Una de las principales consecuencias que trae consigo la mala disposición de los escombros es la contaminación de la atmosfera causada por residuos o productos secundarios gaseosos, sólidos o líquidos; que afectan tanto la salud

humana, como a plantas y animales. El primer efecto de esta contaminación se ve reflejado en la parte estética y no necesariamente en efectos peligrosos [1].

Algunas fuentes hídricas superficiales como ríos, quebradas, cañadas, charcas y lagos, son vulnerables a la contaminación por los escombros, ya que éstos generan problemas de mal sabor y olor del agua, reducen la cantidad de oxígeno en aguas más profundas, generan acumulación de sedimentos en el fondo de lagos, además de cambios químicos producidos por contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas superficiales y subterráneas. Las concentraciones de metales pesados se mantienen en niveles que las fuentes hídricas no son capaces de tolerar, acabando de esta manera cualquier tipo de vida acuática que allí pueda desarrollarse [1].

De igual manera, el suelo puede verse afectado por la acumulación de escombros, que van formando una gruesa capa de cemento y de esta manera van acabando con la biodiversidad y la productividad del suelo. Así mismo, la inadecuada disposición de escombros en vías peatonales y espacios públicos, pueden generar accidentes para peatones y vehículos que por allí transitan. Además de esto, algunos sitios donde se disponen los escombros son también aprovechados por las personas para tirar todo tipo de desecho, causando un problema de proliferación de vectores, generación de malos olores y lixiviados [1].

La inadecuada disposición de escombros no solo es una problemática ambiental relacionada con la invasión del espacio público y la afectación de ecosistemas, también se incluyen algunas deficiencias en los sistemas de acueducto y alcantarillado (obstrucciones) [1].

Cabe destacar a su vez, que la continúa explotación e intervención del suelo por parte de las industrias, también afecta en gran proporción las propiedades físico-químicas y biológicas de éste, sin contar con el lento pero relevante empobrecimiento de los recursos naturales utilizados para la producción del concreto cada vez que este requiera ser elaborado [1].

Es responsabilidad de las autoridades ambientales generar mecanismos de control para la correcta disposición de los escombros. Así mismo, dentro de las Universidades se pueden adelantar investigaciones en las cuales se formulen propuestas para el aprovechamiento racional de estos escombros, favoreciendo la conservación del medio ambiente y proporcionando alternativas técnicas de nuevos concretos que puedan ser utilizados en la industria de la construcción. Este proyecto desarrollado dentro del programa de ingeniería civil hace un aporte en busca de una solución a la problemática de disposición de escombros [1].

## **1.2. ALCANCE**

El presente trabajo se centró en proponer una alternativa de aprovechamiento de escombros para la producción de concreto. La técnica utilizada para el diseño de la mezcla de concreto se basó en utilizar la proporción de agregados que en estado seco produjera el menor porcentaje de vacíos. Se implementó un sistema de dosificación que emplea parcialmente los pasos del ICPC [16]. El trabajo presentado incluyó resultados de especímenes de concreto ensayados a los siete (7) días y se realizó una proyección del valor de la resistencia de concreto esperada para los veintiocho (28) días.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Como resultado de las actividades de construcción se ha encontrado cifras que indican que dentro del rango del 40 y el 50% de los desechos corresponden a materiales sólidos compuestos de asfalto, ladrillo, bloques, arenas, gravas, concreto. Tan solo un 20% del total corresponde a madera y para desechos misceláneos corresponde alrededor del 20 al 30%. De la aplicación de las nuevas políticas ambientales se espera que una buena parte de estos escombros sean reciclados o reutilizados, minimizando el problema de la disposición final.

Mediante el desarrollo de esta propuesta se espera obtener una proporción adecuada de materiales pétreos, incluyendo agregados naturales y aquellos que se obtengan de la selección de los escombros, que permita la elaboración de un diseño de mezcla de concreto a ser utilizado en construcción. Así mismo, se espera presentar un procedimiento que permita el aprovechamiento de los escombros y que minimice los impactos negativos de la disposición inadecuada de estos residuos en las escombreras [2].

Cabe destacar dentro del desarrollo de este trabajo, la importancia en la concientización para la recuperación y reutilización de materiales que se han venido descartando sin control alguno afectando los ecosistemas naturales, de manera que éstos puedan ser acogidos nuevamente dentro de su ciclo de vida útil para generar un nuevo concreto, sin alterar constantemente las fuentes de materias primas. En cuanto a la relevancia social, se espera que esta investigación aporte a la sociedad mejoras en las condiciones en las que se encuentran ciertas comunidades cercanas a los sitios de disposición de escombros y a los sitios destinados a obras civiles.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General.**

- Proponer una alternativa para el aprovechamiento de los residuos provenientes de las actividades de la construcción para Bucaramanga y su área metropolitana.

### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

- Localizar las escombreras de Bucaramanga y su área metropolitana.
- Describir la normatividad ambiental por la cual se rigen las escombreras.
- Caracterizar los residuos que se generan en algunas obras de Bucaramanga.
- Determinar los tipos de residuos (escombros) que se usarán como agregados.
- Realizar pruebas mecánicas, físicas y químicas (granulometría, masa unitaria, gravedad específica, resistencia química, humedad natural y absorción) de cada uno de los agregados.
- Definir la composición óptima de la mezcla entre agregados convencionales y los generados a partir de los escombros.
- Diseñar una mezcla de concreto utilizando cemento portland tipo I, agregados naturales y los obtenidos a partir de los escombros.
- Realizar las pruebas mecánicas de probetas a compresión y flexión.
- Proponer un procedimiento para el aprovechamiento de los escombros en la elaboración del concreto.
- Analizar los resultados obtenidos para proponer una alternativa para el aprovechamiento de los residuos provenientes de las escombreras.

## **1.5. RELEVANCIA DEL ESTUDIO**

Se pretende destacar la importancia del aprovechamiento de los escombros que se producen dentro de las diversas actividades del sector de la construcción. Cabe destacar igualmente, que la disposición final inadecuada de éste tipo de residuos genera impactos negativos en el ámbito medioambiental.

La propuesta entonces es aprovechar los escombros para la producción de concreto nuevo, brindando así oportunidades tales como la generación de empleo, la protección del ambiente, disminución de riesgos en las obras, entre otros. La conclusión con base en los resultados obtenidos sería entonces, que la comunidad sepa que lo que para unos es un residuo, para otros representa una oportunidad como materia prima.

Es importante destacar que resultados parciales de este trabajo fueron presentados en el II Simposio Iberoamericano de Residuos Sólidos, realizado en Barranquilla (24 y 25 de Septiembre de 2009), y derivó en un artículo titulado “Aprovechamiento de los escombros para la producción de concreto” que se encuentra contemplado dentro de las memorias del evento y que se anexa en este trabajo (Anexo 1). Adicionalmente, este trabajo hace parte de los resultados alcanzados por el semillero SIIC que apoya las labores del grupo DeCor, dirigido por la PhD. Ing. María Fernanda Serrano Guzmán, y corresponde a resultados parciales que soportan la iniciativa de investigación “Elaboración de adoquines utilizando escombros como proporción de agregado grueso”, trabajo que está postulado al premio Ecopetrol a la Innovación 2009.

## **1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

El trabajo de tesis que se presenta a continuación se encuentra dividido de la siguiente manera: capítulo 1, incluye la introducción, justificación, alcance, y objetivos que se desean lograr a través del aprovechamiento de los escombros; en el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos necesarios y el marco legal dentro del cual se desarrolló el trabajo. En seguida a esto; aparece la metodología, por medio de la cual se pretende lograr de manera exitosa los resultados esperados, y a su vez cada una de las pruebas que se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

El capítulo 4 se encuentra compuesto por los resultados cualitativos y cuantitativos que se obtuvieron de los ensayos realizados durante el desarrollo de la tesis. El capítulo 5 presenta de manera explícita el análisis realizado a los datos obtenidos. El capítulo 6 cita una propuesta para el aprovechamiento de los escombros de acuerdo al análisis anteriormente realizado. A continuación, en el capítulo 7, contiene las conclusiones a las que se llegaron. El Capítulo 8 plantea las recomendaciones pertinentes respecto al aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales y finalmente el capítulo 9 expone la bibliografía consultada durante la elaboración del presente proyecto.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En las comunidades se adelantan obras con distintos fines, es decir proyectos de vivienda, industria, comercio, oficinas, transporte, servicios domiciliarios y recreación entre otras. Estas obras pueden ser clasificadas en forma general como obras de carácter público o de carácter privado, según se construyan para servicio de la comunidad o para un grupo de personas particulares [2; 3].

Por obras públicas se entienden aquellas obras que adelantan las entidades del Estado para satisfacer necesidades de una comunidad o para uso específico de las entidades estatales. Ejemplos de este grupo de obras se pueden citar la construcción, rehabilitación, ampliación y conservación de vías (calles, avenidas, autopistas), puentes, redes de servicios públicos domiciliarios, terminales de transporte, parques, monumentos, sedes e instalaciones del gobierno y deportivas, entre otras [2; 3].

Por obras privadas se entienden aquellas obras para uso privado las cuales se construyen en áreas de propiedad privada. En esta categoría se clasifican los conjuntos residenciales, edificios para oficinas u hoteles, centros comerciales e industriales, instalaciones industriales y bodegas, y centros educativos y de diversión, entre otras [2; 3].

En general, en todo proyecto de infraestructura se producen escombros, los cuales representan las distintas etapas que ocurren en un proyecto. La mayoría de obras en la ciudad se construyen utilizando como materia prima el concreto. Es entonces importante realizar una descripción general sobre el concreto, sus materiales constitutivos, métodos de análisis y sistemas de colocación. Posteriormente se hará una descripción del marco legal sobre generación de residuos sólidos, definiciones de términos que contextualizan al lector, y se plantea una propuesta para el aprovechamiento de los escombros en las obras.

### **2.1. TEORIA GENERAL DEL CONCRETO**

El concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado a nivel mundial, en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener gracias a que se puede moldear y por sus propiedades para ser usado como elemento estructural y no estructural; además por su economía, razones que hacen de éste, un material de mejor calidad frente a construcciones de madera, mampostería o acero [4]. A continuación establecerán el fundamento y las características del concreto y materiales constitutivos de éste.

#### **2.1.1. Concreto**

En términos generales el concreto puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland Hidráulico), un material de relleno

(agregados), agua y eventualmente aditivos, que al mezclarse y endurecerse forma un todo compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [4].

De igual forma el término concreto se refiere a la mezcla de mortero (compuesto de cemento, arena y agua) y agregado grueso (grava). En algunos países de habla hispana lo denominan también Hormigón.

El concreto, se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agua, agregados y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, una mezcla con ciertas propiedades. De tal manera que los factores básicos en el diseño de una mezcla de concreto son los siguientes [5]:

- Economía
- Facilidad de colocación y consolidación
- Velocidad del fraguado
- Resistencia
- Durabilidad
- Impermeabilidad
- Peso Unitario
- Estabilidad de Volumen
- Apariencia adecuada

Estos factores o características requeridas están determinados por el uso al que estará destinado el concreto y por las condiciones esperadas en el momento de su colocación [5].

### **2.1.2. Cemento**

El cemento es conocido por ser una de las materias primas más utilizada y por ende indispensable en la construcción. Habitualmente no existe obra alguna en la cual, la presencia del cemento no sea protagonista. Es considerado por excelencia como el pegante más económico y versátil, y todas las propiedades con las que cuenta, permite su aprovechamiento en cualquier cantidad de usos [5].

Al mencionar la palabra cemento en el medio de la construcción, y más específicamente en el de la fabricación de concreto para estructuras, implícitamente ésta hace referencia a cemento Portland o cemento a base de portland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes., El cemento Portland tiene propiedades de adhesión y cohesión, que permiten aglutinar los agregados para conformar un concreto con resistencia y durabilidad adecuadas [4; 5].

**2.1.2.1 Proceso de producción del cemento.** En general, el cemento Portland se fabrica a partir de materiales calcáreos y arcillosos con alto contenido de sílice y alúmina, procesados a altas temperaturas. En ocasiones es necesario adicionar otros productos como el óxido de hierro, para mejorar la composición química de las materias primas principales y para controlar el tiempo de fraguado del cemento [4; 5]. El proceso de fabricación del cemento comprende las siguientes etapas (Figura 1):

- **Explotación de materias primas.** Las materias primas se extraen de canteras y se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre a través de palas mecánicas y/o cargadores es suficiente [4; 5].

Una vez extraídos los materiales de las canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 25mm (1”) antes de la molienda con la arcilla [4].



Figura 1 Etapas del proceso productivo del cemento

- **Dosificación, molienda y homogeneización de materias primas.** Esta etapa del proceso puede efectuarse tanto en presencia de agua como en seco. La utilización de uno u otro depende de factores tanto físicos (calidad de las materias primas) como económicos [4; 5].

- **Proceso húmedo.** Las materias primas se llevan a los molinos de crudo donde son mojados para formar la lechada, la cual se lleva a silos de

almacenamiento o silos de crudo, donde se dosifican en proporciones definidas y se envían a un silo de normalización. En este lugar se hacen las correcciones necesarias para obtener la pasta de la calidad deseada. Una vez normalizada se transporta a un tanque circular denominado “balsa” donde se almacena y se mantiene su homogeneidad [4; 5].

- **Proceso seco.** Las materias primas se trituran, se dosifican en proporciones definidas y son llevadas al molino de crudo donde se secan y se reduce su tamaño, obteniéndose un material denominado *harina*, el cual se lleva a los silos de homogeneización, y allí por medio de aire a presión se obtiene la mezcla de los materiales [4; 5].

- **Clinkerización.** Una vez obtenida la pasta en el proceso por vía húmeda y la harina en el proceso por vía seca se someten a un tratamiento térmico en grandes hornos rotatorios, dentro de los cuales ocurre una secuencia de cambios en diferentes secciones del horno (Figura 2) y se resumen en la siguiente Tabla 1:

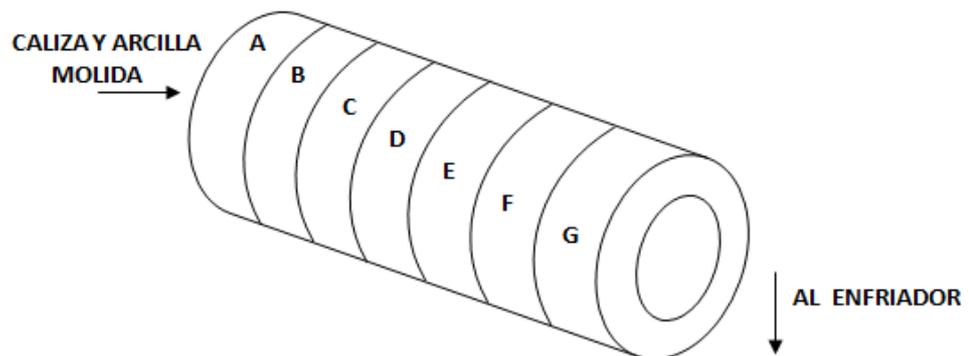


Figura 2 Zonas del horno

Fuente: [4]

A la salida del horno el material se presenta en forma de bolas de dimensión máxima entre 3 y 30mm que se conoce como clinker, el cual sale a una temperatura entre 1200°C y 1300°C [4; 5].

- **Enfriamiento.** El material transformado en clinker debe ser enfriado rápidamente a 70°C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen. El enfriamiento se logra haciendo pasar corrientes de aire frío a través del clinker [4; 5].

- **Adiciones finales y molienda.** Durante este proceso se transforma el clinker en polvo y se agregan las adiciones (por ejemplo, puzolanas o escoria de alto horno). Luego, se introduce el yeso, obteniendo así, lo que se conoce

como cemento Portland. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez entra en contacto con el agua [4; 5].

Tabla 1 Cambios que ocurren en las zonas del horno

TEMPERATURA °C	ZONA	CAMBIO QUE OCURRE DENTRO DEL HORNO
20 – 100	A	Evaporación de agua libre.
>500	B	Deshidratación de los minerales arcillosos.
800	C	Liberación de CO <sub>2</sub> .
900	D	Cristalización de los productos minerales descompuestos. Descomposición del carbonato.
900 – 1200	E	Reacción del CaO con los sílico-aluminatos.
>1250	F	Formación del líquido y de los compuestos del cemento.
1450	G	Se completa la reacción.

Fuente: [4]

- **Empaque y distribución.** El cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaqueta en bultos. También se puede descargar directamente en camiones especiales para su distribución a granel [4; 5].

La operación de empaquetado se hace en máquinas especiales que llenan los sacos y automáticamente los suelta cuando tienen un peso de 50kg (este es el peso por saco estandarizado por las normas colombianas) [4; 5].

**2.1.2.2 Tipos de Cemento.** El cemento es una de las materias primas de la construcción más populares y hoy en día más indispensable. Prácticamente no hay obra alguna que se pueda emprender sin su presencia. Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, sus propiedades de resistencia y durabilidad y por lo tanto por sus destinos y usos. En Colombia, las normas Icontec sobre cemento están basadas en las normas de la ASTM de los Estados Unidos y en la norma NTC 30 se da la clasificación y nomenclatura mostrada en la Tabla 2 [4; 5].

Al momento del diseño de una mezcla de concreto se debe tomar en cuenta el tipo de cemento por cuanto el peso específico y otras propiedades de las mezclas se ven influenciadas por la química del cemento. Es así como por ejemplo para el caso de pavimentos rígidos en donde se pueden dar fenómenos de congelamiento (donde hay estaciones) se recomendaría utilizar el cemento Portland 1-A y 1-M A.

Tabla 2 Tipos de cemento Portland

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND	CARACTERÍSTICAS
Tipo 1	Es el cemento destinado a obras de concreto en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
Tipo 1-M	Destinado a obras de concreto en general, al cual no se le exigen propiedades especiales pero tiene resistencias superiores a las del Portland tipo 1.
Tipo 2	Destinado generalmente a obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos y obras en donde se requiere moderado calor de hidratación.
Tipo 3	Es el cemento que desarrolla altas resistencias iniciales.
Tipo 4	Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
Tipo 5	Es el cemento que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
Blanco	Es el cemento que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca.
Con incorporador de aire	Son aquellos cementos a los que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
Tipo 1A	Es el cemento Portland tipo 1 al cual se le adiciona un material incorporador de aire. Resistente al congelamiento por deshielo.
Tipo 1-MA	Es el cemento Portland 1-M, al cual se le adiciona un material incorporador de aire. Resistente al congelamiento por deshielo.
Tipo 2A y 3A	Son los mismos cemento Portland tipo 2 y tipo 3 pero con un material incorporador de aire. Son resistentes al congelamiento por deshielo.

### 2.1.3. Agua

Es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante que al mezclarse con el cemento le da la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física [4; 5].

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación y curado del concreto. De acuerdo con lo anterior, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado [6].

**2.1.3.1 Agua de mezclado.** Se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita este último para producir una pasta hidratada, con una fluidez tal que permita la lubricación adecuada de la mezcla cuando ésta se encuentra en estado plástico. Esta pasta va estructurándose de forma diferente para producir el gel de cemento. En una porción de pasta hidratada, el agua se encuentra en dos formas básicas [4; 5]:

- **Agua de hidratación:** Es aquella parte del agua de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida del gel [5].
- **Agua evaporable:** Es la parte restante que existe en la pasta; ésta puede evaporarse a un mínimo porcentaje de humedad relativa. No se encuentra libre en su totalidad. El agua evaporable puede existir en tres formas distintas, de acuerdo con su proximidad a la superficie del gel [5].
  - Agua de absorción: Es aquella capa molecular de agua que se encuentra fuertemente adherida a las superficies del gel debido a la acción de las fuerzas intermoleculares de atracción [5].
  - Agua capilar: Es el agua que ocupa los poros capilares de la pasta a distancias mínimas de manera tal que parte de ella está sujeta a la influencia de las fuerzas de la superficie del gel [5].
  - Agua libre: Es aquella que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de la superficie, de tal modo que tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad [5].

**2.1.3.2 Agua de curado.** Se define como el conjunto de condiciones necesarias para que al hidratarse la pasta, evolucione sin interrupción, hasta que todo el cemento se hidrate y la mezcla de concreto alcance su máximo nivel potencial [5].

#### **2.1.4. Agregados**

Los agregados pueden ser definidos como aquellos materiales inertes de forma granular que poseen una resistencia propia suficiente, que no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantizan una adherencia con la pasta del cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de su origen. La razón principal para

utilizar agregados dentro de concreto, es que éstos actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla. Los agregados, en combinación con la pasta fraguada, proporcionan parte de la resistencia a la compresión [4; 5].

Existen agregados cuya fracción más fina presenta actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas, colaborando con la resistencia mecánica del concreto, sin embargo existen agregados que presentan elementos nocivos que reaccionan afectando la estructura interna y las propiedades del concreto como los compuestos sulfurados. Los agregados provienen de una masa mayor que puede haberse fragmentado por procesos evolutivos, o por medio de la trituración mecánica [4; 5].

Los agregados para concreto se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de su tamaño, procedencia y densidad. La forma más generalizada de clasificar los agregados es según su tamaño; y es esta distribución del tamaño de las partículas lo que se conoce con el nombre de granulometría. La fracción fina de éste material, cuyas partículas tiene un diámetro inferior a 4.76 mm y no menor de 0.074mm (74µm), es lo que comúnmente se llama arena o piedra triturada (partida, machacada, pedrejón arena de trituración) y la fracción gruesa; aquellas partículas que tiene un diámetro superior a 4.76 mm, es la que normalmente se denomina agregado grueso o simplemente grava [4; 5].

Los agregados finos y gruesos ocupan cerca del 60% del volumen del concreto e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido. El concreto reciclado es una fuente viable de agregados y una realidad económica, especialmente donde los buenos agregados son escasos. Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice, deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregados friables (disgregables, deleznable o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables. Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar en especial, algunos tipos de cherts, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales [6].

**2.1.4.1 Propiedades físicas de los agregados.** Las propiedades de los agregados dependen en gran parte de la calidad de la roca madre de la cual proceden. Es posible conocer las propiedades por medio de ensayos de laboratorio, determinados por organismos normalizadores, que en Colombia son el Icontec [4] y el Invias.

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, densidad, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas [4].

- **Granulometría.** Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se determina mediante el análisis granulométrico y se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición [4; 5].

- **Análisis Granulométrico.** La operación de separar una masa de agregado en fracciones de igual tamaño, consiste en hacer pasar éste a través de una serie de tamices que tienen aberturas cuadradas y cuyas características deben ajustarse a la norma NTC 32 e INV E-213 [4; 5].

Además de determinar la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados y de visualizarla por medio de un gráfico (curvas granulométricas) que permite conocer que tan grueso o fino es, así como detectar deficiencias o excesos de un tamaño en particular, del análisis granulométrico se derivan algunos factores que se utilizan como parámetros de diseño de una mezcla de concreto [5]. Estos factores son:

- ➔ Módulo de finura: Es un factor que permite estimar que tan fino o grueso es un material. Está definido como el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie normalizada [4; 5].

El valor de este módulo es mayor, cuando el agregado contiene granos más gruesos y disminuye cuando el agregado se reduce de tamaño. Su uso generalmente se ha centrado en la evaluación de “grados de finura” del agregado fino o arena [4; 5].

- ➔ Tamaño máximo: El tamaño máximo del agregado es otro factor que se deriva del análisis granulométrico y está definido como la abertura del menor tamiz de la serie que permite el paso del 100% del material [5].

- ➔ Tamaño máximo nominal: Se define como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más [5].

Se acostumbra a utilizar el módulo de finura para caracterizar al agregado fino y el tamaño máximo y tamaño máximo nominal para caracterizar al agregado grueso [5].

- **Forma de las partículas.** La forma del agregado depende mucho del tipo de roca que lo originó. En términos generales, los agregados procedentes de piedras naturales sometidas a un proceso de trituración y clasificación tienen diferentes formas geométricas. Mientras que los agregados de río o de depósitos (arrastres fluviales o glaciares) tienen formas de cantos redondeados o aplanadas [5].

La clasificación más utilizada para definir la forma de las partículas del agregado, es la descrita en la norma británica B.S-812 que se muestra en la Tabla 3 [5].

- **Textura.** Es de vital importancia ya que incide en 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 de agua requerida, etc [4].

La clasificación de la textura superficial se basa en las características de la superficie de la partícula en términos de si es pulida, mate, suave áspera, lo cual está ligado a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca original. En términos generales, se puede decir que es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados, de río, quebrada o mar, pero la clasificación más utilizada está dada por la norma británica B.S-812 que se muestra en la Tabla 4 [4; 5]. La textura de las partículas más deseable es que éstas tengan la superficie áspera para que haya buena adherencia con la pasta de cemento [4].

- **Densidad o peso específico.** Es la propiedad física de los agregados que depende directamente de las propiedades de la roca original de donde proviene y está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada [4; 5].

En el caso de los agregados que se utilizan para la elaboración de concretos, generalmente existen cavidades o poros que pueden estar vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua, dependiendo de su permeabilidad interna [4; 5].

- **Densidad absoluta.** Se define como la relación entre la masa de las partículas y su volumen absoluto, el cual incluye exclusivamente el volumen de masa sólida, o sea que se excluyen todos los poros, saturables y no saturables [4; 5]
- **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 [4; 5].

Tabla 3 Clasificación de las partículas según su forma.

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
A – Redondeada	Totalmente desgastada por el agua o completamente limitada por frotamiento.
B – Irregular	Irregularidad natural, o parcialmente limitada por frotamiento y con caras redondeadas.
C – Angular	Posee caras bien definidas que se forman en la intersección de caras más o menos planas.
D – Escamosa	Material en el cual el espesor es pequeño en relación con las otras dos dimensiones.
E – Elongada	Material normalmente angular, en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.
F - Escamosa y elongada	Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y éste considerablemente mayor que el espesor.

Fuente: [5].

- **Densidad aparente.** Se denomina densidad aparente a la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan sus partículas, incluidos todos los poros, saturables y no saturables [4; 5].

Tabla 4 Clasificación de la textura superficial de los agregados

GRUPO	TEXTURA SUPERFICIAL	CARACTERÍSTICAS
1	Vítrea	Fractura coloidal.
2	Lisa	Desgastada por el agua, o lisa debido a la fractura de roca laminada o de grado fino.
3	Granular	Fractura que muestra granos más o menos uniformemente redondeados.
4	Áspera	Fractura áspera de roca con granos finos o medianos que contienen partículas cristalinas no fácilmente visibles.
5	Cristalina	Contiene partículas cristalinas fácilmente visibles.

6	Apanalada	Con poros y cavidades visibles
---	-----------	--------------------------------

Fuente: [5].

- **Porosidad y absorción.** La porosidad de las partículas del agregado es muy importante en el comportamiento de los estos dentro del concreto porque una partícula porosa, afecta no solo las propiedades mecánicas (adherencia, resistencia a compresión y flexión) sino también propiedades de durabilidad como la resistencia al congelamiento y deshielo, estabilidad química y resistencia a la abrasión [4; 5].

La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados. Se mide mediante el ensayo indirecto de la absorción de agua, descrito en las normas NTC 176, NTC 237, INV E-222 e INV E-223.

- **Masa unitaria.** Se define como la relación existente entre el peso de una muestra de agregado y el volumen que ocupan esas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido [4; 5].

La masa unitaria de un agregado indica de manera general la calidad de éste y su aptitud para ser utilizado en la fabricación de concreto. Existen dos tipos de masas unitarias [4; 5], las cuales son:

- **Masa Unitaria Suelta.** Se denomina masa unitaria suelta la del material que se encuentra en estado normal de reposo, es decir, que su acomodación dentro del recipiente se ha hecho por simple efecto de la gravedad. El volumen que ocupa es mayor y por lo tanto, su masa unitaria es menor [4; 5].
- **Masa Unitaria Compacta.** Se entiende por masa unitaria compacta el grado de acomodamiento de las partículas del agregado cuando se ha sometido a vibración, ya que ésta mejora el acomodamiento y aumenta el valor de masa unitaria. La importancia de este factor radica en que con él se determinan los volúmenes absolutos de agregados o porcentajes de vacíos en el diseño de mezclas por cuanto las partículas del agregado van a quedar confinadas dentro de la masa de concreto [4; 5].

**2.1.4.2 Propiedades mecánicas de los agregados.** Las propiedades mecánicas que poseen los agregados son: la dureza, resistencia, tenacidad y adherencia [4; 5]. Dentro de estas propiedades, algunas fueron estudiadas en el desarrollo de este proyecto investigativo.

- **Dureza.** Es una propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia de los agregados. La dureza es de vital importancia cuando se van a elaborar concretos sometidos a desgaste por abrasión (pavimentos o revestimientos de canales), por lo que los agregados que se utilicen en la fabricación de estos concretos deben ser duros. La forma más usual de determinar esta propiedad, de una manera indirecta, es el ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles descritos en las normas NTC-98 e INV E-218 para agregados gruesos [4; 5].

**2.1.4.3 Sustancias perjudiciales.** Existen sustancias dentro de los materiales que presentan efectos perjudiciales en el concreto, porque impiden los enlaces entre la pasta de cemento y los agregados [5]. Algunas de estas sustancias fueron estudiadas durante el desarrollo de este proyecto, estas fueron:

- **Materia orgánica.** Generalmente proviene de la descomposición de material vegetal, como hojas, tallos y raíces y se manifiesta en forma de humus. La presencia de este humus en elevadas cantidades puede interferir con las reacciones químicas de la hidratación, así como también puede disminuir la resistencia del concreto y puede afectar la velocidad de reacción del cemento, ocasionando retrasos en su tiempo normal de fraguado [4; 5].

Debido a lo anterior, hay que controlar la presencia de materia orgánica en los agregados, especialmente en la arena, la cual, debido al tamaño de sus partículas, suele retener la materia orgánica finamente dividida y que se encuentra en proceso de descomposición [4; 5]. Las normas NTC 127 e INV E-212 describen el procedimiento para hallar el contenido aproximado de materia orgánica, empleando una prueba colorimétrica.

- **Terrones de arcilla o partículas deleznable.** El agregado grueso no debe contener terrones de arcilla u otros granos o grumos de material deleznable, tales como partículas blandas, madera, carbón, lignito o mica, los cuales disminuyen las propiedades mecánicas del concreto o su durabilidad, en el caso de estar expuestos a la abrasión. Las normas NTC 589 e INV E-211 describen el procedimiento para determinar el contenido de terrones de arcilla o partículas deleznales [4; 5].

- **Sanidad.** La sanidad de los agregados se refiere a su capacidad para soportar cambios excesivos en volumen, debidos a cambios en las condiciones ambientales como congelamiento-deshielo, calentamiento-enfriamiento, humedecimiento-secado, los cuales afectan la durabilidad del concreto y pueden comprometer no solo su aspecto superficial (descascaramientos) sino también la estabilidad de una estructura (agrietamientos internos) [5].

La norma ASTM C-88 ha estandarizado un proceso de secado al horno, mediante varios ciclos, en el cual el agregado que previamente se ha

sumergido en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, es sometido a la acción destructora del sulfato que le induce esfuerzos internos al cristalizarse [5].

**2.1.4.4 Agregados de concreto reciclado.** Durante los últimos años, el concepto de reciclado del concreto ha sido planteado en muchos proyectos, obteniendo resultados en cuanto a ahorro de energía y de material (ECCO 1999). El concreto reciclado es simplemente el concreto viejo que se utilizó para producir agregados. El agregado de concreto reciclado se utiliza principalmente en la reconstrucción de pavimentos. Se le ha usado satisfactoriamente como un agregado en sub-bases granulares, sub-bases de concreto magro, suelo-cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como reemplazo parcial del agregado nuevo [6].

Éste agregado reciclado generalmente tiene una mayor absorción y una masa específica relativamente menor que al agregado convencional. La alta absorción del agregado reciclado aumenta la demanda de agua para que se obtenga la misma trabajabilidad y revenimiento si es comparado con un concreto con agregado convencional. El concreto nuevo producido a partir de concreto reciclado presenta carbonatación, permeabilidad y resistencia a congelación – deshielo similar e incluso mejor que el concreto con agregado convencional. La contracción por secado y la fluencia del concreto con el agregado reciclado es hasta 100% mayor que el concreto con agregado convencional [6].

Sin embargo, se deben producir mezclas de pruebas para la comprobación de la calidad del concreto y para determinar las proporciones adecuadas de la mezcla. Uno de los problemas del uso del concreto reciclado es la variabilidad en las propiedades del concreto viejo, que, a su vez, pueden afectar las propiedades del concreto nuevo. Se le puede evitar parcialmente con el control frecuente de las propiedades del concreto viejo que se éste reciclando. Se pueden hacer necesarios ajustes de las proporciones de la mezcla [6].

#### **2.1.5. Aire**

Cuando el concreto se encuentra en el proceso de mezclado, es normal que atrape aire dentro de la masa, el cual es posteriormente liberado por los procesos de compactación a que es sometido una vez ha sido fundido. Sin embargo, siempre queda un porcentaje mínimo dentro de la masa endurecida. Por otra parte, en algunas ocasiones se incorporan diminutas burbujas de aire, por medio de los aditivos, con fines específicos de durabilidad [4].

#### **2.1.6. Aditivos**

Son materiales diferentes del agua, de los agregados, y del cemento hidráulico que se utilizan como ingredientes del concreto y, que se añaden a la mezcla

inmediatamente antes o durante su mezclado, con el objetivo de modificar sus propiedades para que ésta sea más adecuada a las condiciones de trabajo o simplemente para reducir los costos de producción del concreto. En términos de función éstos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes [4; 5].

## 2.2. PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

El concreto se puede encontrar en estado fresco, en proceso de fraguado o en estado endurecido. La propiedad a la que se hace mayor referencia es a la resistencia a la compresión, pero no hay que olvidar que existen otras propiedades que deben ser controladas para mejorar la eficiencia de los procesos constructivos y aumentar su vida útil [4].

Las propiedades del concreto en estado fresco deben permitir que se llenen adecuadamente las formaletas y los espacios alrededor del acero de refuerzo, así como también obtener una más homogénea sin grandes burbujas de aire o agua atrapada. A continuación se explica, de manera general, cada una de estas propiedades [4].

### 2.2.1. Manejabilidad

La manejabilidad, conocida también como trabajabilidad, es la capacidad que tiene el concreto para ser colocado y compactado apropiadamente sin que se produzca segregación alguna. Está representada por el grado de compacidad, cohesividad, plasticidad y la consistencia o movilidad [4].

- **Compacidad.** Es la facilidad con la que el concreto o mortero fresco es compactado para reducir el volumen de vacíos y por lo tanto el aire atrapado [4].
- **Cohesividad.** Es la aptitud que tiene la mezcla de concreto o mortero en estado fresco para mantenerse como una masa estable y sin segregación [4].
- **Plasticidad.** Es la condición que le permite al concreto o mortero fresco deformarse continuamente sin romperse [4].
- **Consistencia o movilidad.** Capacidad que tiene el mortero o concreto fresco de adquirir la forma de los encofrados que lo contienen, y de llenar espacios vacíos alrededor de los elementos que absorbe [4].

La trabajabilidad se selecciona de acuerdo al tamaño y características de la sección a construir, las condiciones de colocación de la mezcla y el sistema de compactación utilizado [4].

Hoy en día no se conoce ningún método directo para medir la manejabilidad de una mezcla de concreto. Sin embargo, hay algunos ensayos que permiten correlacionar esta propiedad del concreto, en estado fresco, con alguna otra característica [5]. Dentro de estos ensayos, se destacan los siguientes:

**2.2.1.1 Ensayo de Asentamiento.** Debido a su simplicidad y rapidez, lo convierte en el ensayo más usado en todo el mundo para determinar la manejabilidad del concreto fresco. Este ensayo mide la consistencia o fluidez de una mezcla cuando se encuentra en estado plástico [4; 5].



Figura 3 Ensayo de asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó a la mezcla de concreto preparado con agregados y escombros durante el desarrollo de este proyecto en la elaboración de los cilindros y vigas de concreto (Figura 3). Este ensayo se encuentra especificado en la norma NTC 396.

**2.2.1.2 Otros ensayos.** La manejabilidad también puede ser medida mediante otros procedimientos entre los cuales se destacan el ensayo con la esfera de Kelly, el ensayo de remoldeo y el factor de compactación. El ensayo con la bola de Kelly, descrito en la norma ASTM C360, se basa en la resistencia a la penetración del concreto. Los resultados se expresan con la profundidad que se alcanza. No existe una correlación simple entre el ensayo de asentamiento y el de la bola de Kelly, ya que el primero evalúa la trabajabilidad midiendo la consistencia, y el segundo determinando la resistencia a la penetración [4; 5].

El ensayo de remoldeo, descrito en la norma ASTM C124, mide la trabajabilidad con base en el esfuerzo que se hace para que una mezcla de concreto rellene un molde de confinamiento. El factor de compactación se

determina por la relación de densidad antes del ensayo comparada con la densidad del mismo concreto completamente compactado [4; 5].

### **2.2.2. Segregación**

Se define como la separación de los materiales que constituyen una mezcla heterogénea (como es el concreto), de manera que su distribución deje de ser uniforme por falta de cohesión [4; 5].

Entre las causas que puede producir la segregación se encuentran la diferencia de tamaño de las partículas y su distribución granulométrica, así como la densidad de sus constituyentes y su proporción dentro de la mezcla. Otras causas que dependen del manejo y colocación pueden ser el mal mezclado, un inadecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación [4; 5].

### **2.2.3. Exudación o sangrado**

Es una forma de segregación o sedimentación, en la cual parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto recién colocado o en proceso de fraguado. Esto se debe a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado [4; 5].

La exudación del concreto está influenciada por las proporciones de la mezcla y las características de los materiales, el contenido de aire, el uso de aditivos convencionales o minerales y por la gradación de los agregados [4; 5].

### **2.2.4. Masa unitaria y rendimiento volumétrico**

La masa unitaria del concreto fresco y endurecido depende del tamaño máximo, granulometría y densidad de los agregados, así como también de la cantidad de aire atrapado e incorporado y del contenido de agua y cemento. Se mide mediante el ensayo de rendimiento volumétrico descrito en la norma NTC-1926, que consiste en determinar la masa requerida para llenar un molde de volumen conocido [4; 5].

### **2.2.5. Contenido de aire**

El aire siempre está presente en todos los tipos de concreto, localizado en los poros no saturables de los agregados y formando burbujas entre los componentes del concreto, bien sea porque es atrapado durante el mezclado o al ser intencionalmente incorporado por medio del uso de agentes inclusores, tales como cementos o aditivos [4].

## **2.2.6. Contenido de agua**

El contenido de agua es un factor determinante para el desempeño del concreto. Cuando se presenta variación en las propiedades en estado fresco de una batida a otra, es probable que se deba a un cambio en el contenido de agua de la mezcla, lo cual originaría un efecto desfavorable en las propiedades del concreto en estado endurecido [4].

Es de gran importancia medir la cantidad de agua debido a que es base fundamental para determinar si la cantidad de agua real presente en la mezcla es la estipulada en el diseño de mezcla. La norma NTC 3752 describe dos procedimientos para hallar la cantidad de agua [4].

## **2.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO**

El concreto en estado endurecido tiene muchas características como la masa unitaria, propiedades mecánicas, térmicas, acústicas, eléctricas; su apariencia, etc. En general, las propiedades mecánicas se encuentran gobernadas por la resistencia de la pasta endurecida [4]. En esta etapa del proceso, el concreto está adquiriendo la resistencia para la cual fue diseñado.

### **2.3.1. Resistencia**

Es una habilidad para resistir esfuerzos y de allí que se pueda considerar de cuatro maneras: compresión, flexión, tracción y corte. El concreto presenta alta resistencia a los esfuerzos de compresión y muy poca a los de tracción y flexión [4; 5].

**2.3.1.1 Resistencia a la compresión.** Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requerimientos de diseño. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para el diseño de estructuras. En Colombia se utilizan los procedimientos de las normas NTC 550, NTC 673 y la norma INV E-402, en donde se describen los métodos de elaboración y ensayo de los especímenes [7].

La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión y se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en Estados Unidos o en Megapascuales (MPa) en unidades SI [7].

La falla de los cilindros de concreto generalmente se presenta según planos inclinados respecto a la dirección de carga, porque la fricción que se genera

entre el espécimen y los platos de carga restringe los movimientos laterales. La forma usual de falla es en cono, sin embargo, algunas veces el error se produce en las formas que aparecen en la Figura 4 [4].

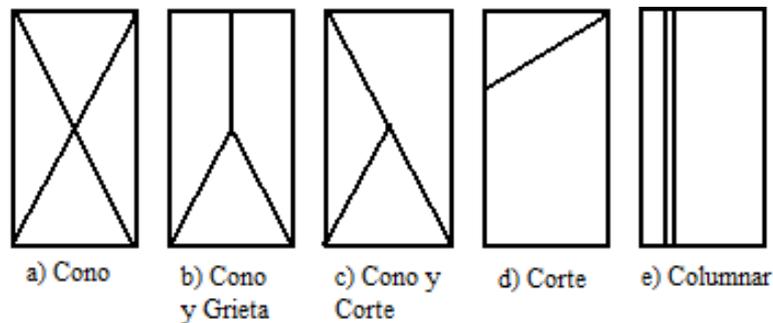


Figura 4 Tipos de falla de los cilindros de concreto

Fuente: [4].

**2.3.1.2 Resistencia a la flexión.** La resistencia a la flexión del concreto se refiere a menudo al modulo de rotura. Los elementos sometidos a flexión tienen una zona sometida a compresión y otra región en que predominan los esfuerzos de tracción. Este factor es importante en estructuras de concreto simple, como las losas de pavimentos [4].

El modulo de rotura se evalúa por medio de ensayos a flexión sobre vigas de sección de 15cm de lado, 15cm de alto y 60cm de largo. Las normas ASTM C 293, NTC 2871 y INV E-402 describen el procedimiento para realizar el ensayo sobre concretos convencionales cargando las vigas en uno y dos puntos [4]. El ensayo de resistencia a flexión se realizó a las vigas elaboradas en el proyecto, aplicando la carga en dos puntos (Figura 5).

**2.3.1.3 Resistencia a tracción.** Por su naturaleza, el concreto es bastante débil a esfuerzos de tracción, esta propiedad conduce generalmente a que no se tenga en cuenta en el diseño de estructuras. La tracción tiene que ver con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de la temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tracción [4]. La norma NTC-722 describe el procedimiento para realizar el ensayo.

**2.3.1.4 Resistencia a cortante.** La resistencia del concreto a esfuerzos de cortante es baja, sin embargo, generalmente es tomada en cuenta por los códigos de diseño estructural. Este tipo de esfuerzos es importante en el diseño de vigas y zapatas, en donde se presentan valores superiores a la resistencia del concreto [4].



Figura 5 Ensayo de flexión con carga en dos puntos

## 2.4. TEORÍA GENERAL DE RESIDUOS

La generación de residuos aumenta de manera proporcional con relación a la mejora en el nivel de vida de las personas. Las condiciones y la calidad de vida se han ido transformando conforme pasa el tiempo, hallándose que la proporción de residuos orgánicos ha disminuido, y la proporción para plásticos, papel y envases ha venido aumentando. Esta conclusión a nivel general, podría adoptar un comportamiento diferente a nivel particular en diversas poblaciones [8].

### 2.4.1. Residuo sólido

Según el Decreto 1713 del 6 de Agosto de 2002, Residuo Sólido es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas [9].

El Decreto 1713 de 2002 define que es posible clasificar los residuos en dos grupos según su utilidad en:

**2.4.1.1 Residuo sólido aprovechable.** Es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo [9]. Los residuos sólidos aprovechables son parte de la fuente de trabajo de los recicladores de las ciudades. Los escombros pueden ser considerados como parte de este tipo de residuos.

**2.4.1.2 Residuo sólido no aprovechable.** Es todo material o sustancia sólida o semisólida de origen orgánico e inorgánico, putrescible o no, proveniente de actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación en un proceso productivo. Son residuos sólidos que no tienen ningún valor comercial, requieren tratamiento y disposición final y por lo tanto generan costos de disposición [9].

**2.4.1.3 Composición física de los residuos.** La composición física de los residuos depende no solo del grado de desarrollo del generador de residuos, sino también de las costumbres. Las características físicas determinan el potencial recuperable para ciertos productos y la mejor estrategia tecnológica para un posterior tratamiento [10]. Gracias a éstas características se puede apreciar de manera clara que la composición de los residuos sólidos en las ciudades es en su mayoría de papel y cartón, vidrio y cerámica, metales, plásticos, cueros, textiles, vegetales madera, ladrillos y ceniza; siendo el papel y cartón el que presenta el porcentaje más alto aún en países desarrollados [10].

En actividades de la construcción, la generación de residuos (escombros) dependerá entonces del tipo de actividad que se lleve a cabo, en las cuales se podría encontrar concreto, ladrillo, tejas, madera, vidrios, papel, cartón, plástico, yeso. En obras viales o de mantenimiento, se podrían encontrar, por ejemplo residuos como asfalto, hormigón, suelo, áridos y metales [8].

**2.4.1.4 Composición química de los residuos.** Determinar la composición química de los residuos es importante, pues gracias a ella se puede establecer el tipo de tratamiento que se les dará a los residuos sólidos. En base a este indicador se logran conocer los materiales volátiles, características como la humedad, la cantidad de ceniza, la DBO, DQO, la relación carbono nitrógeno C/N y el poder calórico [8].

La mayor parte de los escombros provenientes de las actividades de construcción y demolición presentan un índice de peligrosidad bajo, pero sí generan gran impacto visual por el espacio que ocupan. El aspecto a destacar dentro del tratamiento, aprovechamiento y valorización de estos escombros, es la disminución en la explotación de canteras, remplazando el material extraído, por un nuevo producto con mejores especificaciones técnicas [8].

### **2.4.2. Residuo peligroso**

Según el Decreto 1713 del 6 de Agosto de 2002, un residuo peligroso es aquel que por sus características infecciosas, tóxicas, explosivas, corrosivas, inflamables, volátiles, combustibles, radiactivas o reactivas puedan causar riesgo a la salud humana o deteriorar la calidad ambiental hasta niveles que causen riesgo a la salud humana. También son residuos peligrosos aquellos que sin serlo en su forma original se transforman por procesos naturales en residuos peligrosos. Así mismo, se consideran residuos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos [8].

### **2.4.3. Escombros**

El material residuo de actividades de demolición, remodelación y construcción es conocido como escombros. Usualmente, los escombros se clasifican como residuos urbanos, aunque están más relacionados con la actividad industrial que doméstica [11]. La tendencia actual de la construcción sostenible es mediante la búsqueda de la eficiencia lograr la reducción de impactos negativos en las distintas labores que comprende la ingeniería. Diversos estudios experimentales se han desarrollado en base al aprovechamiento del concreto, como residuo sólido producto de demoliciones [12; 13]. Algunos de los materiales que se reciclan pueden presentar propiedades físico-mecánicas que afectan la calidad, resistencia y durabilidad del concreto que se produce. Por tanto es necesario, verificar el contenido de material arcilloso y la densidad que se alcanza al compactar estos materiales y contemplar las variables en el diseño de la mezcla de concreto [12; 13].

Durante el desempeño económico e industrial de las empresas del sector de la construcción se generan escombros. Hoy en día, durante el desarrollo de una obra un porcentaje despreciable de estos materiales se recupera [14]. Las nuevas políticas ambientales en Colombia, destacan el reciclaje o reúso para contribuir a la disminución de costos ambientales por aseo y limpieza fuera de la obra [3].

## **2.5. PRINCIPALES ACTIVIDADES GENERADORAS DE ESCOMBROS EN LA CONSTRUCCIÓN Y/O REMODELACIÓN DE EDIFICACIONES Y DEMAS INSTALACIONES SIMILARES**

Según [3] son varias las etapas que permiten la materialización de las obras públicas y privadas. Normalmente, todo proyecto de construcción en un terreno baldío empieza con actividades de descapote, seguido de la excavación y la preparación de los cimientos, que normalmente son armados utilizando concreto. En términos generales, en todas las etapas de un proceso constructivo (Figura 6) se generan escombros que deben ser manejados adecuadamente con lo ordenado en la Resolución 541/94. A continuación se

describe cuales son los escombros que se generan en las principales actividades de construcción y/o remodelación:

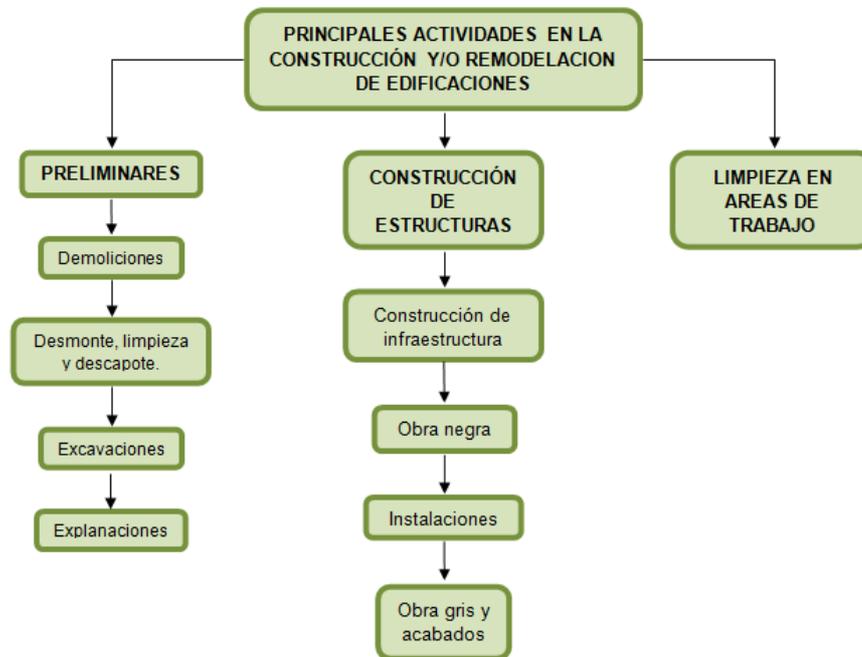


Figura 6 Actividades en la construcción y/o remodelación de edificaciones

### 2.5.1. Preliminares

Durante el desarrollo de las actividades preliminares los escombros generados se manejan dentro del área de influencia del proyecto en zonas previamente delimitadas. Es importante definir cuál es el área total que involucran los trabajos, considerando las zonas donde se emplazarán las obras, los sitios para campamentos, tránsito peatonal o de vehículos, sitios de depósitos o almacenamiento de materiales de construcción, áreas para la disposición de escombros y aislamiento. Se consideran actividades preliminares las labores de cerramiento y aislamiento del lote o zona de la obra, las demoliciones, la localización y replanteo, el desmonte y limpieza, el descapote, las excavaciones y la explanación.

**2.5.1.1 Demoliciones.** Producen materiales que en un alto porcentaje son reutilizables y/o reciclables. Los materiales que se pueden reutilizar en actividades posteriores de la obra son los áridos y minerales, constituidos básicamente por residuos de mampostería, de placas de concreto y de estructuras como vigas y columnas en concreto armado o metálicas.

**2.5.1.2 Desmonte, limpieza y descapote.** El terreno natural o áreas que ocuparán las obras comúnmente se encuentran cubiertas de rastrojo, maleza, bosque, pastos y/o cultivos. Esta actividad incluye también la remoción de

troncos, raíces, escombros y basuras, de modo que el terreno quede limpio y libre de toda vegetación y su superficie resulte apta para iniciar los demás trabajos. El suelo producto del descapote tiene un alto contenido de materia orgánica, arenas, limos y arcillas.

**2.5.1.3 Excavaciones.** Un alto porcentaje de los materiales provenientes de esta actividad pueden usarse posteriormente en la misma obra, ya sea como rellenos o como capas de base. El suelo producto del descapote tiene un alto contenido de materia orgánica, arenas, limos y arcillas.

**2.5.1.4 Explanaciones.** Se refieren a las labores cuyo propósito es definir perfiles y niveles definitivos para las cimentaciones de las estructuras. El material que se genera en esta actividad es similar al que se produce en las excavaciones [3]. El material proveniente de explanaciones puede ser almacenado en sitio o dispuesto en sitios de acopio para ser utilizado en rellenos para proyectos viales o inclusive para proyectos de vivienda.

## **2.5.2. Construcción de estructuras**

Las estructuras corresponden al tipo de obra que forma el “armazón” a partir del cual se crea el proyecto definitivo. En esta parte se considera la utilización de materiales de construcción y producción de escombros que pueda haber en las siguientes actividades:

**2.5.2.1 Construcción de infraestructura.** Comprende las actividades de cimentación, vigas, columnas y placas. En la ejecución de esta parte de la obra pueden producirse escombros y sobrantes de materiales de construcción como: agregados pétreos, arenas de las mezclas de concreto, sobrantes de mezclas, recortes de varilla o hierro, puntillas y pedazos de madera utilizada como formaleta.

**2.5.2.2 Obra negra.** Conocida como la elaboración de mampostería, pañetes y cubierta. La mayor producción de escombros se concentra en los retales y pedazos de ladrillo, teja o bloque utilizados para la elaboración de mampostería y cubiertas. En segunda instancia, están los escombros de materiales áridos para las mezclas de mortero y resto de mezcla.

**2.5.2.3 Instalaciones.** Pueden ser instalaciones hidráulicas, sanitarias, eléctricas, mecánicas, gas y electrónicas. Esta actividad produce escombros como restos de tuberías, pedazos de cables y alambres, empaques de pegantes, empaques de papel o cartón.

**2.5.2.4 Obra gris y acabados.** En la obra gris se ejecutan actividades como elaboración de estucos, cielo raso, afinado de piso, carpintería en blanco y aparatos sanitarios. En los acabados se ejecutan actividades relacionadas

con pintura, enchapes, acabado de pisos, instalación de accesorios, decoración y paisajismo.

Esta actividad produce escombros como restos de cal, de pinturas, de thinner, de hidrocarburos, y motero o lechadas, recortes de virutas, aserrín de madera y de carpintería metálica, envases y empaques de plástico, cartón o papel: y tierra o material vegetal, principalmente.

### **2.5.3. Limpieza en áreas de trabajo**

En cualquier estado que se encuentre la obra, los procesos de limpieza van a generar escombros y basuras. En algunos de los procesos y trabajos se generan aguas de desperdicio. En las obras pueden generarse aguas residuales en circunstancias como:

- Lavado de herramientas de trabajo.
- Lavado de equipo y maquinaria.
- Lavado y limpieza de llantas y partes exteriores de vehículos de transporte a la obra.
- Lavado de tanques o recipientes de almacenamiento.
- Sobrantes de agua: utilizados en la fabricación de mezclas de concreto, mortero, lechadas.
- Aguas lluvias. Procedentes de patios, vías y zonas libres dentro de la construcción.

## **2.6. MARCO LEGAL**

De acuerdo a lo que cita [1], desde la reforma constitucional de 1991 cobró importancia el manejo de la política ambiental. Desde entonces, la legislación ambiental busca preservar y proteger los recursos naturales, además de defender los derechos que tienen los colombianos a disfrutar un ambiente sano. La base legal del aprovechamiento de los residuos está consignada en la Constitución Política de Colombia, Ley 99 de 1993, Ley 152 de 1994, Resolución 541 de 1994, Decreto 1713 de 2002, Ley 388 de 1997, Decreto 605 de 1996, Decreto 605 de 1996. A continuación se presentan algunos artículos relacionados con la temática de residuos sólidos en cada una de estas normativas.

### ***Constitución política de Colombia***

Artículo 8: “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas

culturales y naturales de la Nación”.

Capítulo 3 Artículo 79: “Todas las personas tienen derecho a gozar un ambiente sano”. Es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80: Corresponde al Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines; correspondiéndoles igualmente la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución debiendo así mismo, cooperar con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas. Que a fin de desarrollar las obligaciones contenidas en las normas constitucionales en cita, se hace necesario adelantar la evaluación y estudio de los activos biológicos de la Nación y de los factores responsables de su deterioro, con el objeto de conocer la composición, estructura, distribución y funciones de la biodiversidad, así como las interrelaciones existentes entre los ecosistemas naturales y modificados, y utilizar estos conocimientos como base imprescindible para el desarrollo sostenible.

Capitulo 5 Artículo 366: El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Sera objeto fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento básico y de agua potable.

### ***Ley 99 del 22 de Diciembre de 1993***

Por el cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental SINA y se dictan otras disposiciones.

Artículo 5 Numeral 2: Regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y el uso, manejo, aprovechamiento, conservación, restauración y recuperación de los recursos naturales a fin de impedir, reprimir, eliminar o mitigar el impacto en actividades contaminantes, deteriorantes o destructivos del entorno o patrimonio natural.

Artículo 5 Numeral 11: Dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir las contaminaciones geosférica, hídrica, del paisaje, sonora y atmosférica, en todo el territorio nacional.

### ***Ley 152 del 15 de Julio de 1994***

Por el cual se establece la ley orgánica del Plan de Desarrollo. En el capítulo 1

artículo 3 numeral h) Sustentación ambiental. Para posibilitar un desarrollo socio-económico en armonía con el medio natural, los planes de desarrollo deberán considerar en sus estrategias, programas y proyectos, criterios que le permitan estimar los costos y beneficios ambientales para definir las acciones que garanticen a las actuales y futuras generaciones una adecuada oferta ambiental.

### ***Resolución 541 del 14 de Diciembre de 1994***

Por el cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica y subsuelo de excavación.

Artículo 2. En materia de cargue, descargue y almacenamiento; está prohibido el cargue, descargue y almacenamiento temporal o permanente de los materiales y elementos para la realización de obras públicas sobre, zonas verdes, áreas arborizadas, reservas naturales o forestales y similares, áreas de recreación y parques, ríos, quebradas, canales, caños, humedales y en general cualquier otro cuerpo de agua. En materia de disposición final; está prohibido la disposición final de los materiales y elementos a que se refiere esta resolución, en áreas de espacio público.

Artículo 3. Escombreras. Los municipios deben seleccionar los sitios específicos para la disposición final de los materiales y elementos a que se refiere esta resolución, que se denominarán escombreras municipales. Esta selección se hará teniendo en cuenta los volúmenes producidos y las características de los materiales y elementos, así como las distancias óptimas de acarreo.

Las escombreras municipales se localizarán prioritariamente en áreas cuyo paisaje se encuentre degradado, tales como minas y canteras abandonadas, entre otros, con la finalidad principal de que con la utilización de estos materiales se contribuya a su restauración paisajística.

La definición de acceso a las escombreras municipales tendrá en cuenta la minimización de impactos ambientales sobre la población civil, a causa de la movilización de vehículos transportadores de materiales.

### ***Decreto 1713 del 06 de Agosto de 2002***

Artículo 1. Definiciones. Escombros. Es todo residuo sólido sobrante de las actividades de construcción, reparación o demolición, de las obras civiles o de otras actividades conexas, complementarias o análogas.

Artículo 44. Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores

de escombros su recolección, transporte y disposición en las escombreras autorizadas. El Municipio o Distrito y las personas prestadoras del servicio de aseo son responsables de coordinar estas actividades en el marco de los programas establecidos para el desarrollo del respectivo Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS.

La persona prestadora del servicio público de aseo podrá prestar este servicio, de acuerdo con los términos de la Resolución 541 de 1994 del Ministerio del Medio Ambiente o la que la sustituya o modifique. En cualquier caso, la recolección, transporte y disposición final de escombros deberá efectuarse en forma separada del resto de residuos sólidos

Artículo 102. Disposición de escombros. Los escombros que no sean objeto de un programa de recuperación y aprovechamiento deberán ser dispuestos adecuadamente en escombreras cuya ubicación haya sido previamente definida por el Municipio o Distrito, teniendo en cuenta lo dispuesto en la Resolución 541 de 1994 del Ministerio del Medio Ambiente o la norma que la sustituya o modifique y demás disposiciones ambientales vigentes.

### ***Ley 388 del 18 de Julio de 1997. Plan de Ordenamiento Territorial (POT)***

Capítulo 2 Artículo 8. “Acción urbanística. La función pública del ordenamiento territorial local se ejerce mediante la acción urbanística de las entidades distritales y municipales, referida a las decisiones administrativas y las actuaciones urbanísticas que le son propias, relacionadas en el ordenamiento del territorio y la intervención en los usos del suelo”. Son acciones urbanísticas, entre otras: Localizar y señalar las características de la infraestructura para la disposición final de los escombros.

### ***Decreto 605 del 27 de Marzo de 1996***

Artículo 46. Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores de escombros su recolección, transporte y disposición en las escombreras. Las entidades prestadoras del servicio de aseo en la zona son responsables de coordinar estas actividades.

La entidad prestadora del servicio público de aseo podrá prestar este servicio como especial, de acuerdo con los términos del presente Decreto. En cualquier caso, la recolección, transporte y disposición de escombros deberá efectuarse en forma separada del resto de residuos sólidos.

Parágrafo. Cuando estos residuos se arrojen clandestinamente en vías y áreas públicas, la entidad prestadora del servicio público domiciliario de aseo es responsable de su recolección y disposición final, sin perjuicio de las sanciones a que haya lugar.

Artículo 47. Recolección de tierra. La recolección de tierra será considerada como un servicio especial de acuerdo con los términos del presente Decreto. La tierra deberá en lo posible independizarse de otro tipo de residuos, con el fin de permitir su disposición como relleno en zonas verdes, jardines y similares.

Artículo 79. Disposición de escombros. Los escombros deberán ser dispuestos adecuadamente en escombreras previamente definidas por el municipio, de conformidad a las disposiciones ambientales vigentes.

### **3. METODOLOGÍA**

La preparación de una mezcla de concreto convencional requiere el cumplimiento de una serie de etapas previas como son la selección adecuada de los materiales y la definición de una relación agua/cemento que responda a un asentamiento y a una resistencia de diseño [15]. Cuando se va a preparar un concreto con un agregado no convencional, se deben caracterizar los materiales para posteriormente definir aquellos que se pueden utilizar para la preparación de la mezcla. El procedimiento que se siguió para el diseño y la preparación de la mezcla de concreto utilizando escombros como una proporción del agregado grueso y agregado fino fue el siguiente:

### **3.1. VISITA INFORMATIVA A LA AUTORIDAD AMBIENTAL COMPETENTE**

Inicialmente se realizaron visitas a la Corporación de Defensa para la Meseta de Bucaramanga (CDMB), autoridad ambiental competente en la ciudad y su Área Metropolitana, en cuyos archivos reposa la información de las escombreras autorizadas de la región; adicionalmente, esta entidad cuenta con un conocimiento amplio respecto a la normatividad ambiental vigente. De acuerdo a la información suministrada por la CDMB, se iniciaron los respectivos contactos con las personas encargadas de la administración de las escombreras, en busca de una autorización para el ingreso a las mismas. Se destaca que aunque existen 3 escombreras, tan solo se permitió el acceso a una de ellas, pero su nombre es confidencial a solicitud del administrador de la misma.

### **3.2. VISITA DE RECONOCIMIENTO A LA ESCOMBRERA AUTORIZADA**

Una vez se obtuvo el permiso para el ingreso a la escombrera, se realizó una visita de inspección del lugar en busca de recolectar información que pudiera servir para la realización del proyecto (Figura 7). Los datos que allí se consiguieron no fueron de gran utilidad por cuanto la información existente correspondía al volumen diario de escombros, sin discriminación del tipo de escombros o del peso de los mismos. De acuerdo a este resultado, se decidió utilizar escombros de proyectos de construcción dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga. De esta manera, se obtuvo el ingreso a dos proyectos de la constructora Marval, de donde se pudieron obtener las muestras necesarias para la elaboración de los especímenes.



Figura 7 Visita de inspección a la escombrera

### **3.3. REVISIÓN DE LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL**

De acuerdo a lo establecido en la legislación colombiana referente al manejo y disposición final de los escombros, fue necesario verificar el cumplimiento de los parámetros que en la normatividad ambiental colombiana se establecen para el aprovechamiento y disposición final de los escombros en los sitios de acopio. Adicionalmente, se evaluaron los procesos de operación y la vigencia del permiso de funcionamiento de la escombrera visitada.

### **3.4. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE ESCOMBROS**

Las muestras de escombros fueron tomadas de proyectos de vivienda en Bucaramanga y Floridablanca, ambas emplean un proceso constructivo tipo túnel y pertenecen a la constructora Marval. Allí se seleccionaron los escombros, de forma cualitativa, que podían ser utilizados como agregados en el diseño y la preparación de la muestra de concreto.

De la obra ubicada en Bucaramanga, frente al éxito oriental, se recolectaron muestras de escombros gruesos. De la obra ubicada en Versalles (Cañaveral) se recolectaron algunas muestras de escombros finos. También se recolectaron muestras de escombros de mampostería (Figura 8) de las dos obras mencionadas anteriormente; estas últimas fueron reducidas de tamaño manualmente en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.



Figura 8 Escombros de mampostería recolectados

### **3.5. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES**

El material a caracterizar estaba conformado por Agregado Fino o Arena extraída del río Pescadero; Agregado Grueso o Triturado proveniente de la trituradora La Estrella y por los escombros que fueron clasificados cualitativamente como Escombros Gruesos ( $E_1$ ), Escombros Finos ( $E_2$ ) y muestras de ladrillo que fueron trituradas manualmente en tamaños finos ( $E_3$ ) y gruesos ( $E_4$ ). El material  $E_2$  y  $E_3$ , obtenido en las obras, se encontraba triturado dentro de la obra (Figura 9), ya que en las mismas, realizan el aprovechamiento de los escombros para la elaboración de morteros y concretos de andenes.

Una vez seleccionados y cuantificados los escombros, se sometieron a ensayos de granulometría, masa unitaria, gravedad específica, humedad natural, materia orgánica, absorción, partículas deleznales, desgaste en la máquina de los ángeles y densidad del cemento. Todos estos ensayos se aplican normalmente a muestras de material pétreo que van a ser utilizados en la elaboración de concreto.

Para la elaboración de dichos ensayos, se siguieron las normas INVIAS del año 2007 y las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las cuales establecen los procedimientos a seguir para la elaboración de los ensayos los que se le deben hacer a los agregados que van a ser utilizados en mezclas de concreto. A continuación, se describe brevemente el procedimiento que se llevó a cabo en la realización de cada uno de los ensayos mencionados anteriormente.



Figura 9 Muestra de escombros grueso

En el ensayo de masa unitaria suelta y compacta, se trabajaron diferentes proporciones de agregados convencionales (grueso y fino) y no convencionales (escombros), con el fin de obtener la proporción que arrojará el menor porcentaje de vacíos. Información necesaria para hacer el diseño de mezcla.

### **3.5.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos**

La etapa de la caracterización de los agregados y escombros se inició con el ensayo de granulometría. Se tomaron muestras de 3 costales diferentes, escogidos al azar, y se redujeron por cuarteo manual con el fin de obtener las cantidades requeridas para todos los ensayos que se realizaron. Cabe resaltar que este procedimiento se realizó con todos y cada uno de los materiales que se iban a utilizar en la preparación de la mezcla de concreto.

De cada una de las muestras cuarteadas, se escogió una porción para el ensayo. Éste comenzó con el secado de las muestras a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se determinó la masa de las mismas. Después de secadas, se lavaron las muestras (Figura 10) sobre el tamiz de  $75\mu\text{m}$  (No. 200); seguido a esto, se secaron y se determinó su masa. Este procedimiento se hizo para determinar la cantidad de material fino que pasa a través del tamiz.



Figura 10 Proceso de lavado de las muestras

Después de lavadas y secadas las muestras, se seleccionó la cantidad de materiales finos y gruesos para realizar el análisis granulométrico. Luego, se escogió el grupo de tamices adecuados, colocándolos en orden decreciente por tamaño de abertura. Seguido a esto, se inició el proceso de tamizado haciendo pasar las muestras por el grupo de tamices, empezando con el de mayor abertura. A medida que se avanzaba en este proceso, se iba determinando la cantidad de material retenido en cada tamiz.

Una vez finalizado todo el proceso, se realizaron los cálculos necesarios, cuales se muestran en el capítulo de resultados. El ensayo de granulometría se realizó tres veces con el propósito de obtener resultados más representativos.

### **3.5.2. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados gruesos y finos**

De cada una de las muestras cuarteadas se seleccionó una porción para el ensayo. Éste se inicia con el secado de los agregados a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta una masa constante. Para obtener la cantidad de arena, escombros y ladrillo fino, fue necesario pasar las muestras por el tamiz No. 16 para separar las partículas más finas que 1,18mm; la cantidad requerida no debía ser menor de 25g.

El agregado, escombros y ladrillo grueso se separaron en diferentes tamaños empleando los tamices No. 4, 3/8", 3/4", 1/2". Las cantidades mínimas para el ensayo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Masa mínima de agregado grueso para el ensayo

Tamaño de las partículas entre los tamices	Masa mínima de la muestra de ensayo (g)
No. 4 (4.75 mm) - 3/8" (9.5 mm)	1000
3/8" (9.5 mm) - 3/4" (19.0 mm)	2000
3/4" (19.0 mm) - 1½" (37.5 mm)	3000

Fuente: [17]

Una vez determinada la masa de la muestra de ensayo, ésta se sumergió en agua durante  $24 \pm 4$  horas. Después del periodo de inmersión, se intentó romper las partículas, haciéndolas rodar y apretándolas entre el dedo pulgar y el índice. Luego, se separaron las partículas de menor tamaño de la parte restante mediante tamizado en húmedo, usando los tamices que se indican en la Tabla 6.

Tabla 6 Tamices empleados para remover los terrones de arcilla y partículas deleznales

Intervalos de tamaños de las partículas que forman la muestra	Tamaño del tamiz para remover terrones de arcilla y partículas deleznales
Agregado fino retenido sobre el tamiz de 1.18 mm (No. 16)	850 $\mu\text{m}$ (No. 20)
No. 4 (4.75 mm) - 3/8" (9.5 mm)	2.36 mm (No. 8)
3/8" (9.5 mm) - 3/4" (19.0 mm)	4.75 mm (No. 4)
3/4" (19.0 mm) - 1½" (37.5 mm)	4.75 mm (No. 4)

Fuente: [17]

Después del tamizado en húmedo, se removieron las partículas retenidas en cada tamiz y se introdujeron en el horno para el secado; una vez se encontraban secas las muestras, se determinó la masa de las mismas y se procedió a realizar los cálculos necesarios.

### 3.5.3. Contenido aproximado de materia orgánica en agregados finos

De cada una de las muestras cuarteadas se escogió una porción para el ensayo. Éste se inició preparando una solución de hidróxido de sodio al 3%. Los agregados finos se dejaron secando al aire y se tomaron aproximadamente 450g para el ensayo. Se colocó el material en el frasco de ensayo hasta completar un volumen aproximado de 130ml. Se le añadió la solución de hidróxido de sodio hasta lograr que el volumen total de agregado y líquido fuera aproximadamente de 200ml. Después, se agitó el frasco y se dejó reposar por 24 horas.

Para definir con mayor precisión el color del líquido de la muestra ensayada, se utilizaron cinco vidrios de color (Figura 11). El resultado del ensayo fue el número de la placa orgánica, cuyo color haya sido más parecido al color del líquido de la muestra.

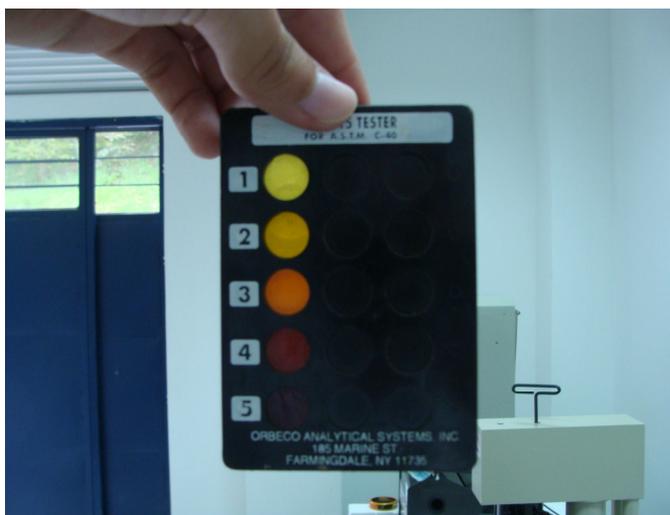


Figura 11 Escala de vidrios de colores de referencia

#### 3.5.4. Gravedad específica y absorción de agregados

El procedimiento para hallar la gravedad específica y absorción de agregados es diferente para finos y para gruesos. A continuación, se describe por separado el procedimiento utilizado para hallar la gravedad específica y absorción de agregados finos y de agregados gruesos.

**3.5.4.1 Agregados Finos.** De cada una de las muestras cuarteadas se escogió una porción de 1kg, aproximadamente, para el ensayo. Esta cantidad fue secada a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $290 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ), se dejó enfriar y se cubrió con suficiente agua. Se mantuvo en estado sumergido, a temperatura ambiente, por un lapso de 15 a 19 horas.

Después del período de inmersión, se decantó cuidadosamente el agua y se extendió la muestra sobre una superficie plana no absorbente. Luego se inició el secado de la superficie de las partículas dirigiendo sobre las muestras, una corriente de aire caliente (Figura 12). Para agilizar el secado, se volteaban periódicamente las muestras, pero siempre dirigiendo la corriente de aire sobre ellas. Éste procedimiento se realizó hasta que las partículas empezaron a fluir libremente.



Figura 12 Secado de muestra de agregado fino en el ensayo de gravedad específica y absorción

Una vez logrado lo anterior, se realizó la prueba del cono para chequear la condición de saturada y superficialmente seca. Al alcanzar esta condición, se hicieron las determinaciones de peso. Seguido a esto, se llenó parcialmente el picnómetro con agua e inmediatamente, se introdujeron en él  $500 \pm 10\text{g}$  de la muestra saturada con superficie seca; se le añadió agua hasta completar un 90% de su capacidad. Para eliminar el aire atrapado, se hizo rodar el picnómetro sobre la superficie, e incluso se agitó un poco para eliminar todas las burbujas de aire. Una vez todas las burbujas de aire se desaparecieron, se determinó el peso total (picnómetro, agua y muestra).

Después de determinar el peso total, se removió todo el agregado fino del picnómetro, se secó a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se determinó la masa de la muestra después de haber realizado el ensayo.

**3.5.4.2 Agregados Gruesos.** El ensayo de gravedad específica para agregados gruesos, inició eliminando el material inferior a 4.75mm de las muestras previamente cuarteadas y seleccionadas, mediante un tamizado en seco; luego se lavaron completamente los agregados para remover los finos adheridos a la superficie. Las cantidades mínimas requeridas por la norma INV E-223 para el ensayo son las mostradas en la Tabla 7, en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Después de haber removido las partículas finas, se secaron las muestras en el horno. Posteriormente, se sumergieron en agua a temperatura ambiente, por un periodo de 15 a 19 horas. Luego de la inmersión, se secaron las partículas rodándolas sobre un paño absorbente; una toalla, hasta haber eliminado toda el agua superficial visible. A continuación, se determinó la masa de la muestra en estado saturada con superficie seca (sss).

Tabla 7 Cantidad mínima de muestra para el ensayo

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra (kg)
Mm	Pulg	
hasta 12.5	1/2"	2
19	3/4"	3
25	1"	4
37.5	1½"	5
50	2"	8

Fuente: [18]

Una vez determinado éste peso, se colocó la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determinó su masa sumergida en agua; se secó la muestra en el horno y se finalizó el ensayo determinando su masa.

### 3.5.5. Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles

El ensayo de resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles, inició escogiendo una porción de cada una de las muestras previamente cuarteadas, las cuales fueron lavadas y secadas al horno a temperatura constante comprendida entre  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $290 \pm 9^\circ\text{F}$ ). Se escogió de la Tabla 8 la gradación más parecida al agregado que se iba a utilizar en la elaboración de los cilindros y las vigas. De acuerdo con la granulometría elegida se determinó la carga abrasiva (Tabla 9) a utilizar y la cantidad de material ensayado.

Tabla 8 Granulometrías para la muestra del ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles

PASA TAMIZ		RETENIDO EN TAMIZ		MASA DE MUESTRA PARA ENSAYO (g)			
mm	Pulg	mm	Pulg	GRANULOMETRÍAS			
				A	B	C	D
37.5	1½"	25	1"	1250±25	-	-	-
25	1"	19	¾"	1250±25	-	-	-
19	¾"	12.5	½"	1250±10	2500±10	-	-
12.5	½"	9.5	3/8"	1250±10	2500±10	-	-
9.5	3/8"	6.3	¼"	-	-	2500±10	-
6.3	¼"	4.75	No. 4	-	-	2500±10	-
4.75	No. 4	2.36	No. 8	-	-	-	5000±10

Fuente: [19]

Tabla 9 Carga abrasiva para el ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles

GRANULOMETRÍA DE ENSAYO	NÚMERO DE ESFERAS	MASA TOTAL (g)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Fuente: [19]

Se escogió la granulometría B y una carga abrasiva de 11 esferas. Luego, la muestra y la carga abrasiva correspondientes se colocaron en la máquina de los ángeles (Figura 13). Ésta se hizo girar a una velocidad comprendida entre 30 y 33r.p.m. hasta completar 500 giros. Una vez cumplido el número de vueltas, se descargó el material de la máquina y seguido a esto, se separó el material ensayado empleando el tamiz de abertura de 1.70mm (No.12). El material que fue retenido por el tamiz No.12, se lavó, se secó en el horno a una temperatura comprendida entre  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) y se determinó su masa. Al finalizar el procedimiento se realizaron los respectivos cálculos.

### 3.5.6. Masa unitaria y porcentaje de vacíos de agregados gruesos

El ensayo de masa unitaria, suelta y compacta, de los agregados se inició escogiendo una porción de cada una de las muestras cuarteadas, aproximadamente de 125 – 220% de la cantidad requerida para llenar el recipiente de medida; esta cantidad fue de  $8 \pm 1\text{kg}$ , y la muestra fue secada en el horno. Antes de comenzar con la determinación de las masas unitarias, fue necesario hallar el volumen y el peso del recipiente donde se iba a realizar el ensayo.

Se determinaron las masas unitarias sueltas, en primera instancia, y luego las masas unitarias sueltas, por el método del apisonado o varillado de todos los agregados y escombros, gruesos y finos, con cada proporción de mezcla planteada (Tabla 10). Una vez culminado el procedimiento, se realizaron todos los cálculos correspondientes a masas unitarias y porcentaje de vacíos de la mezcla.

### 3.5.7. Humedad natural de agregados gruesos y finos

La determinación de la humedad natural de los agregados gruesos y finos, se realizó determinando una cantidad de muestra cuarteada de agregado, en su estado natural; luego se dejó secando la muestra en el horno a una temperatura entre  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ), dejándola enfriar para posteriormente determinar la masa de la muestra después de secada. La humedad natural de la muestra, se calculó de acuerdo a la Ecuación 1.

$$W = \frac{A - B}{B} \times 100$$

Ecuación 1.

**W** = Humedad de la muestra (%)  
**A** = Masa original de la muestra (g)  
**B** = Masa de la muestra seca (g)



Figura 13 Muestra de agregado grueso y carga abrasiva en el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles

### 3.5.8. Densidad del cemento

Se utilizó Cemento Diamante para la elaboración de la mezcla de concreto. Antes de empezar con el diseño de la mezcla, se debía conocer un último dato y era la densidad del cemento. El procedimiento que se siguió se encuentra descrito en la norma Invias INV E-307-07. En la determinación de la densidad del cemento, se empleó kerosene, conocido como ACPM, libre de agua.

El ensayo comenzó sumergiendo el frasco de Le Chatelier en un baño de agua a la temperatura de calibración, ésta era 20°C, dejándolo reposar allí durante un tiempo. Luego, se llenó el frasco con ACPM hasta un punto situado entre 0 y 1ml (Figura 14). Seguido a esto, se secó el frasco por encima del nivel del líquido después de haberlo vertido y se tomó la primera lectura. Se agregó el cemento Portland, aproximadamente 64g, en pequeñas cantidades. Después de agregar todo el cemento, se colocó el tapón en el frasco y se giró en posición inclinada, con el fin de sacarle el aire.

Tabla 10 Proporciones de mezcla establecidos.

MEZCLA		PROPORCIÓN (%)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Esc 1 (E1)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
B	Arena (A)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Grueso (G)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Esc 2 (E2)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
C	Arena (A)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Grueso (G)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Esc 3 (E3)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
D	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Esc 4 (E4)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
E (Blanco)	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	90	80	70	60	50	40	30	20	10



Figura 14 Frasco de Le Chatelier con ACPM

Una vez que el frasco fue sumergido en el baño de agua, se hicieron lecturas cada 5 minutos hasta que se obtuvo un valor constante. La densidad del cemento fue calculada de acuerdo a la ecuación 2, que se muestra a continuación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa del cemento (g)}}{\text{Volumen desplazado (cm}^3\text{)}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

### 3.6. DISEÑO DE LA MEZCLA

Para el diseño de mezcla se adoptó el concepto de utilizar la combinación de agregados que proporcionara el menor porcentaje de vacíos, procedimiento similar al establecido por la Road Note Laboratory (RNL) y que está descrito en [16]. Los pasos generales que se siguieron para el diseño de la mezcla son los que se contemplan en la Figura 15 y se resumen a continuación:

#### 3.6.1. Selección del asentamiento

El asentamiento se tomó de la Tabla 11. Para el criterio de selección se tuvo en cuenta la consistencia del concreto (media), el grado de trabajabilidad (medio) y el tipo de estructura (losas y pavimentos). Para el diseño de la mezcla de concreto, se trabajó con un asentamiento de 5cm según los criterios de selección anteriormente mencionados.

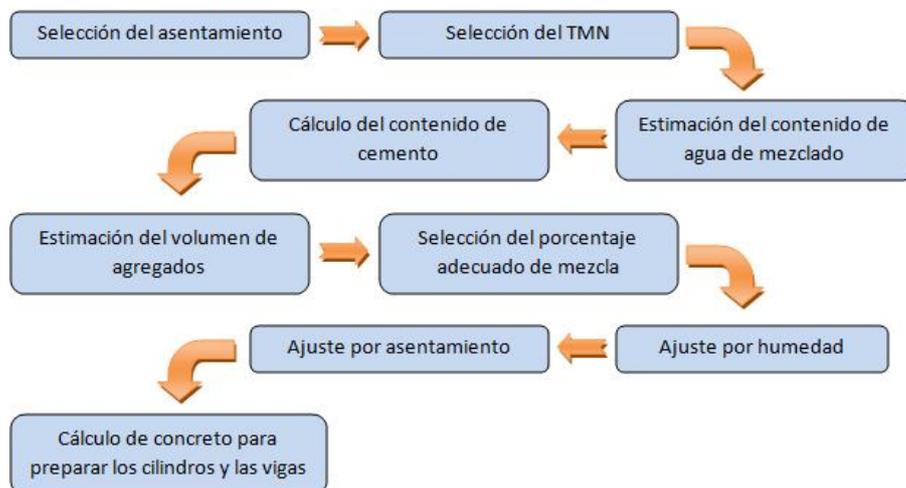


Figura 15 Pasos que se siguieron para el diseño de la mezcla

#### 3.6.2. Selección del tamaño máximo nominal

El tamaño máximo nominal (TMN) para el diseño de la mezcla, se obtuvo de las granulometrías realizadas a los diferentes tipos de agregados gruesos disponibles. Se trabajó con un TMN de 25mm (1”).

Tabla 11 Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de estructuras

ASENTAMIENTO (cm)	CONSISTENCIA (Tipo de concreto)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA
0.0 - 2.0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de formaleta.
2.0 - 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados y contruidos con extrusoras.
3.5 - 5.0	Semi – seca	Pequeño	Construcciones masivas. Losas medianamente reforzadas. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0 - 10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas. Pavimentos y losas compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración.
10.0 - 15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. Recomendable para sitios de difícil compactación.

Fuente: [16].

### 3.6.3. Estimación del contenido de agua de mezclado

La estimación del contenido de agua de mezclado se obtuvo de la Tabla 12 y el criterio para seleccionar de manera aproximada ésta cantidad, estuvo en función del TMN de los agregados y del asentamiento de diseño.

El valor seleccionado del contenido de agua de mezclado (Tabla 12) para un asentamiento de 5cm (50mm) y un tamaño máximo del agregado de 1” fue de 183Kg/m<sup>3</sup> de concreto.

### 3.6.4. Cálculo del contenido de cemento

Para poder calcular el contenido de cemento de la mezcla, fue necesario determinar antes, la relación agua/cemento medida en peso, determinada básicamente por los requisitos de resistencia.

Se seleccionó una relación agua/cemento de 0.45 para una resistencia de diseño superior a 280Kg/cm<sup>2</sup> (4000psi) a los 28 días (Figura 16). Una vez obtenida la relación A/C y el contenido de agua de mezclado, se procedió a

calcular el contenido de cemento por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de concreto, dividiendo el contenido de agua entre la relación A/C.

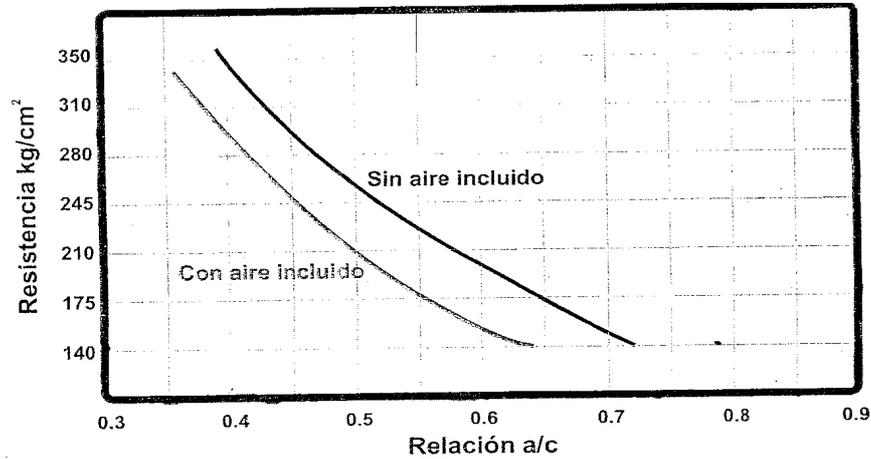


Figura 16 Resistencia a la compresión Vs relaciones A/C

Fuente: [16].

Tabla 12 Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregados, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido

ASENTAMIENTO		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg)							
		9.51	12.7	19	25.4	38.1	50.8	64	76.1
mm	Pulg	3/4"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
		Agua de mezclado, en Kg/m <sup>3</sup> de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: [5]

### 3.6.5. Estimación del volumen de agregados

La estimación del volumen de agregados se realizó empleando el método de la Road Note Laboratory (RNL), el cual es similar al de la ACI en sus primeras

etapas [16]. Como ya se conocía el volumen de cemento y agua, se restó la suma de estos valores a  $1\text{m}^3$  de concreto, obteniendo de esta manera el volumen de las partículas de agregados.

$$D_{prom} = (\%_F)(d_F) + (\%_G)(d_G) + (\%_E)(d_E) \quad \text{Ecuación 3.}$$

$d_G$  = Densidad aparente de la grava.

$d_F$  = Densidad aparente de la arena.

$d_E$  = Densidad aparente del escombros.

$\%_F$  = Porcentaje de la arena, en forma decimal.

$\%_G$  = Porcentaje de la grava, en forma decimal.

$\%_E$  = Porcentaje del escombros, en forma decimal.

Conocido el volumen de agregados y calculada la densidad aparente promedio de los mismos (Ecuación 3), se determinó la masa de la grava, arena y escombros. La densidad aparente promedio de los agregados se calcula por medio de la expresión anterior. Esta expresión se utiliza cuando las densidades de los agregados son muy parecidas.

### 3.6.6. Selección del porcentaje adecuado de mezcla

El porcentaje adecuado de mezcla fue aquel que arrojó el menor porcentaje de vacíos de las diferentes proporciones de mezcla entre agregados y escombros que se emplearon en el ensayo de masa unitaria suelta y compacta.

### 3.6.7. Ajuste por humedad

La estimación de la cantidad de agua de mezclado se realiza asumiendo que los agregados están en la condición SSS, sin embargo, los agregados que se usan en obras nunca están en esta condición, ni están totalmente secos, siempre tendrán un exceso de agua (agua libre) o un defecto (por absorción). Por lo tanto se debe restar la cantidad en exceso o sumarle la cantidad en defecto [16].

Cuando la humedad que presenta el agregado es mayor que la absorción, significa que hay agua libre con respecto a la condición SSS, en este caso se le resta dicha cantidad; por el contrario, cuando la absorción es mayor que el grado de humedad, hay agua en defecto en relación con la condición SSS, por lo que hay que sumarle esta cantidad [16].

Para determinar el sobrante o faltante de agua en los agregados utilizados en el proyecto, se implementaron las ecuaciones 4 y 5 [16]:

$$\text{Agua en exceso (agua libre) } A_L = M (H - Abs) \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$\text{Agua en defecto } A_D = M (Abs - H) \quad \text{Ecuación 5.}$$

$A$  = Agua en exceso o defecto.

$Abs$  = Absorción del agregado.

**M** = Peso de la muestra seca.

**H** = Humedad del agregado.

### 3.6.8. Ajuste por asentamiento

El diseño que se ha venido explicando permite conocer unas cantidades que teóricamente producen un concreto con proporciones adecuadas. Sin embargo, existen factores de los materiales que no se detectan en los ensayos e imprecisiones del método, que generalmente tienen como consecuencia la producción de un concreto con propiedades algo diferentes a las esperadas [16].

Por esta razón, antes de cada mezclada, se hacía una mezcla de prueba para comprobar que las cantidades teóricas calculadas cumplieran con las características deseadas. Una de las cosas que se verificaba era el asentamiento de la mezcla. Si éste no era el correcto, se aumentaba o disminuía la cantidad estimada de agua en 2kg por cada centímetro de aumento o disminución en el asentamiento requerido [16].

Una vez concluidos todos los pasos para el diseño de la mezcla de concreto, se procedió a la preparación de los especímenes correspondientes (Figura 17). Los agregados, escombros, cemento y agua se mezclaron mecánicamente en el área de laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana. En total se realizaron 240 cilindros y 48 vigas sobre cuyos resultados se hicieron los análisis estadísticos correspondientes.



Figura 17 Elaboración de cilindros de concreto

### 3.7. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Luego de haber preparado los especímenes correspondientes, se procedió al desarrollo de la prueba mecánica a compresión (Figura 18) a los 7, 14 y 28 días de edad de los cilindros elaborados con agregados y escombros. La prueba mecánica a flexión se realizó a los 28 días de edad de las vigas (Figura 5). Se siguió el procedimiento descrito en la norma Invias INVE-402 y la NTC 673.



Figura 18 Elaboración de la prueba de resistencia a la compresión

## 4. RESULTADOS.

El desarrollo de este trabajo ha permitido identificar las escombreras autorizadas para la disposición final de los escombros que se generan en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Así mismo, con los resultados de la encuesta realizada durante el desarrollo de la Monografía de la Ing. Mónica Acosta, dentro del programa de Especialización en Gerencia e Interventoría de Obras Civiles de la UPB, se identificó el nivel de conocimiento sobre manejo de escombros por parte de constructores de la región. Adicionalmente, se realizó una mezcla de concreto partiendo de agregados naturales y de materiales reciclados; ensayos en estado fresco y endurecido fueron realizados a estos especímenes. De acuerdo a lo anterior, se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto. El análisis de los resultados se presenta en el capítulo siguiente.

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL REFERENTE AL TEMA DE MANEJO DE LOS ESCOMBROS EN BUCARAMANGA Y SU AREA METROPOLITANA

Como se mencionó anteriormente, solo fue permitido el acceso a una de las escombreras. En este lugar se observó que no existe una balanza o estación de pesaje, no se hace un tratamiento inicial a los escombros y la acomodación de los mismos se hace utilizando maquinaria pesada (Figura 19). El único control que existe se hace por metro cubico ( $m^3$ ) de la volqueta que transporta los escombros y un registro del nombre de la persona interesada en disponer los escombros; en este lugar se exige la cancelación de unos derechos para la disposición de los escombros.



Figura 19 Acomodación de escombros en el sitio de disposición

También se pudo observar, que la vía de acceso a la escombrera se encuentra en pésimo estado y que prácticas erradas de disposición por parte de constructores sin conciencia ciudadana han propiciado la presencia de escombros en las proximidades a la escombrera. La escombrera visitada cuenta con el permiso de funcionamiento vigente.

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR

El material seleccionado de acuerdo a la metodología establecida para este estudio estaba conformado por Agregado Fino o Arena extraída del río Pescadero; Agregado Grueso o Triturado proveniente de la trituradora La Estrella y por los escombros que fueron clasificados cualitativamente como Escombro Grueso (E<sub>1</sub>), Escombro Fino (E<sub>2</sub>) y muestras de ladrillo que fueron trituradas manualmente en tamaños finos (E<sub>3</sub>) y gruesos (E<sub>4</sub>).

Tabla 13 Resultados de los ensayos realizados a los agregados y escombros

ENSAYOS REALIZADOS		MUESTRA DE ENSAYO					NORMA	
		AG. FINO	ESC. FINO	LAD. FINO	AG. GRUESO	ESC. GRUESO		LAD. GRUESO
Humedad natural (%)		5.1	4.4	5.0	1.2	4.1	2.4	
Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)		4.4	3.0	1.8	0.2	0.4	0.3	INV E-211-07 NTC 589
Contenido aprox. de materia orgánica.		3	1	0	-	-	-	INV E-212-07 NTC 127
Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Aparente 23/23°C	2.69	2.57	2.61	2.62	2.56	2.53	INV E-222-07
	Bulk S.S.S 23/23°C	2.56	2.30	2.29	2.58	2.36	2.15	INV E-223-07
	Bulk 23/23°C	2.48	2.12	2.09	2.55	2.24	1.90	NTC 237
Porcentaje de absorción (%)		3.1	8.1	9.6	1.1	5.6	13.1	NTC 176
Desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles (%)		-	-	-	38.0	41.3	93.4	INV E-218-07 NTC 98
Masa Unitaria (g/cm <sup>3</sup> )	Suelta	1.5	1.2	1.2	1.4	1.2	1.0	INV E-217-07
	Compacta	1.6	1.3	1.3	1.5	1.3	1.1	
Vacíos de MUC (%)		38.2	38.5	38.4	39.9	42.7	41.5	NTC 92

La Tabla 13 presenta los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras seleccionadas. Así mismo, los resultados de aquellos ensayos que no se encuentran en ésta tabla, se muestran a continuación:

#### 4.2.1. Densidad del cemento

La densidad del cemento fue calculada de acuerdo a la ecuación 2 (mostrada en el numeral 3.5.8). Este valor era necesario conocerlo por cada bulto de cemento, ya que se iba a utilizar en el diseño de la mezcla. De acuerdo a lo anterior y con el fin de obtener un valor más representativo, se calculó la densidad por cada 3 bultos del cemento. Para lograr esto, se seleccionó una pequeña cantidad de cada bulto, se mezclaban bien, y con esta cantidad de cemento se repitió el ensayo tres veces. Los valores que se muestran a continuación (Tabla 14), son los promedios obtenidos.

Tabla 14 Densidades promedios del Cemento Diamante

ENSAYO	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.94
2	2.96
3	2.97
4	2.99
5	2.99
6	2.98
7	2.99
8	2.98

#### 4.2.2. Análisis granulométrico

Con el ensayo de análisis granulométrico, descrito en la norma del Invias INV E-213-07, se obtuvo la clasificación de los agregados de acuerdo al tamaño de las partículas, la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No.200), el tamaño máximo nominal (TMN) en los agregados gruesos (Tabla 15) y el modulo de finura de los agregados finos (Tabla 16).

El tamaño máximo nominal (TMN) está definido como la abertura del menor tamiz de la serie o de menor abertura, por el que pasa todo el material [20]. El TMN que se obtuvo de las granulometrías fue el que se muestra en la Tabla 15, para el diseño de la mezcla, se decidió cambiar este valor para el agregado grueso y el ladrillo grueso, ya que el porcentaje que se retuvo en el tamiz de 25.4mm (1") era muy bajo y no era muy representativo este porcentaje.

Tabla 15 Tamaño máximo nominal del agregado, escombros y ladrillo grueso

MUESTRA	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	
	mm	pulg
Agregado grueso	38.1	1½
Escombros gruesos	25.4	1
Ladrillo grueso	38.1	1½

Tabla 16 Módulo de finura obtenido en la arena, escombros y ladrillo fino

MUESTRA	MÓDULO DE FINURA		
	1	2	3
Agregado fino	2.81	2.87	2.80
	<b>Prom: 2.82</b>		
Escombros finos	2.19	2.74	2.50
	<b>Prom: 2.45</b>		
Ladrillo fino	2.77	2.78	2.58
	<b>Prom: 2.71</b>		

El módulo de finura para cada muestra de agregado fino, se calculó sumando los porcentajes retenidos en los tamices de 150 µm (No.100), 300 µm (No.50), 600 µm (No.30), 1.18 µm (No.16), 2.36 mm (No.8), 4.75mm (No.4), 9.5 mm (3/8”), 19.0 mm (3/4”), 37.5 mm (1/2”); y dividiendo la suma por 100 [20].

La clasificación de los agregados gruesos según su tamaño se muestra en las Figuras 20, 21 y 22; y la clasificación de los agregados finos en las Figuras 23, 24 y 25.

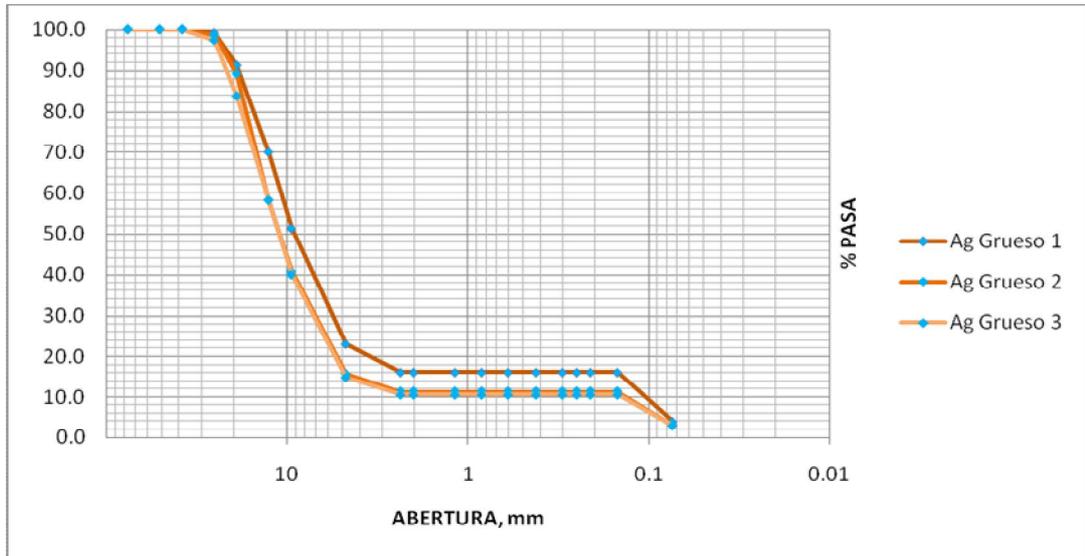


Figura 20 Granulometría del agregado grueso

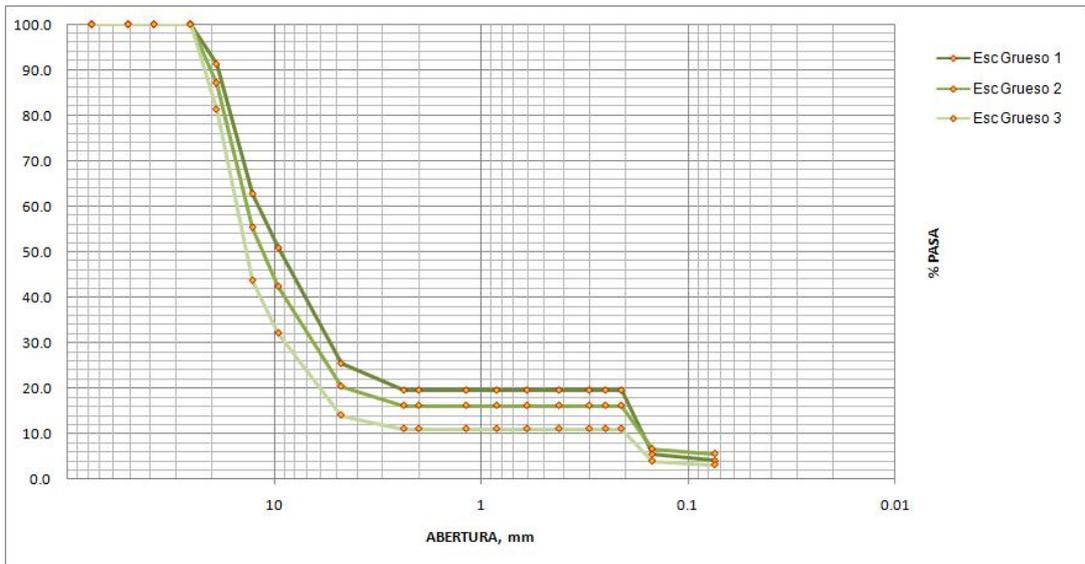


Figura 21 Granulometría del escombros grueso

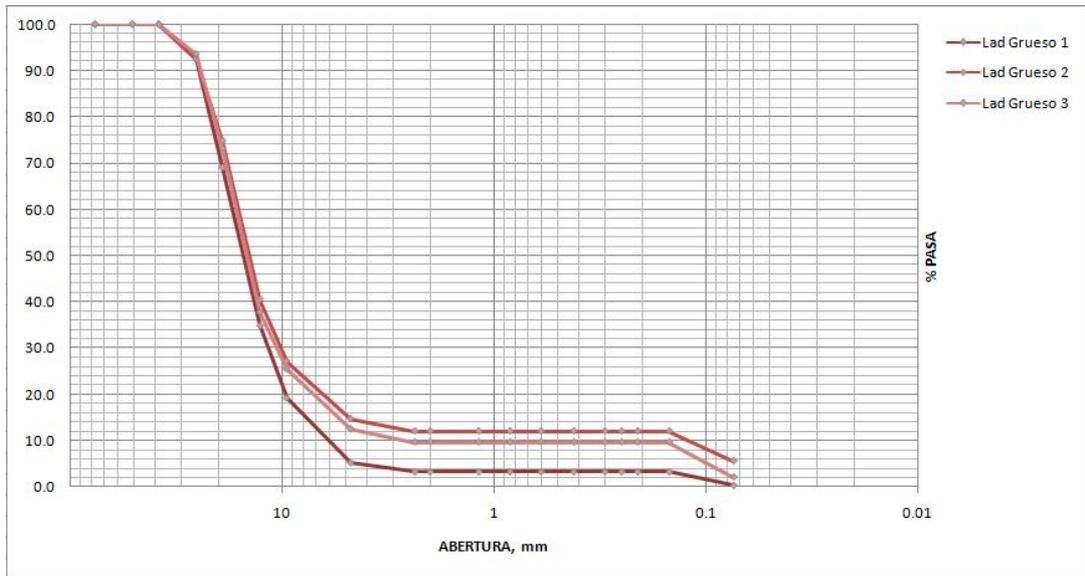


Figura 22 Granulometría del escombro de ladrillo grueso

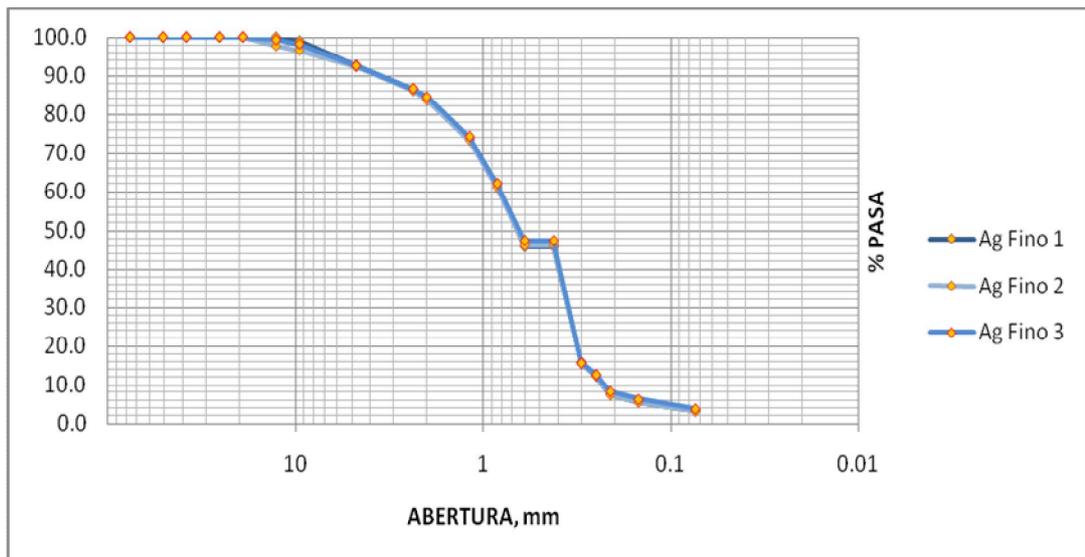


Figura 23 Granulometría del agregado fino

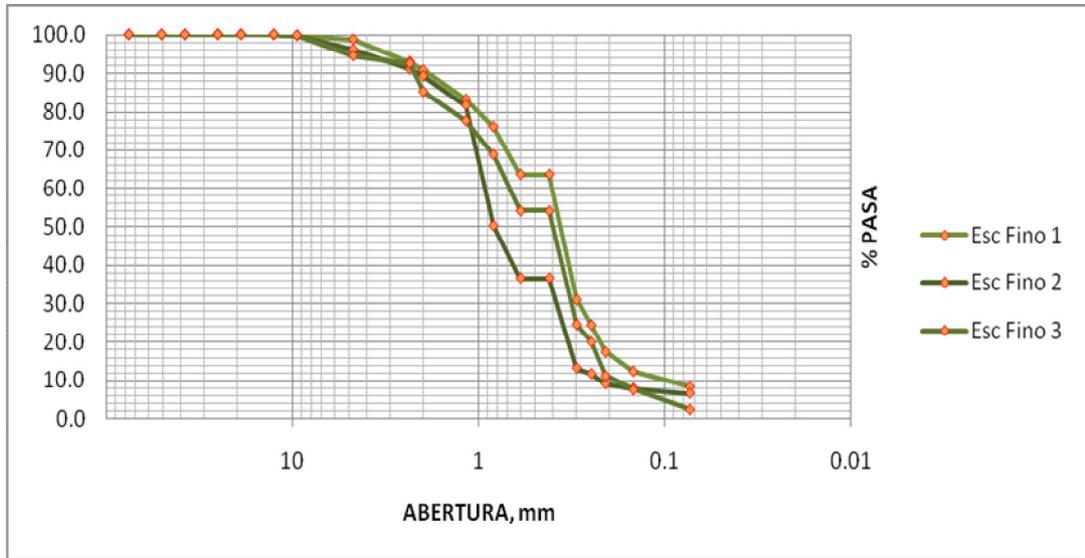


Figura 24 Granulometría del escombro fino

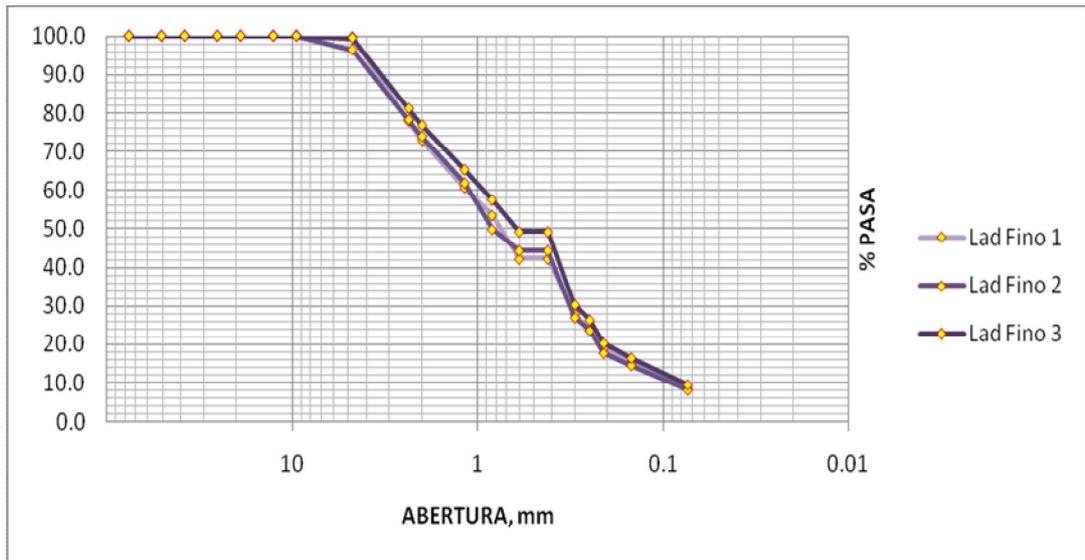


Figura 25 Granulometría del escombro de ladrillo fino

#### 4.2.3. Determinación de la mezcla de agregados con el menor porcentaje de vacíos

Para el diseño de la mezcla de concreto, el criterio fue seleccionar la mezcla de agregados que proporcione el menor porcentaje de vacíos más o menos un 10%, criterio que fue escogido teniendo en cuenta que se buscaba cubrir datos antes y después del punto de inflexión; estos puntos fueron recomendados atendiendo a la experiencia en estudios previos de diseños bajo esta metodología. Con todos los agregados se determinó el porcentaje de vacíos de la mezcla.

En la Tabla 17 se muestran las diferentes proporciones de mezcla de agregados convencionales y no convencionales, utilizadas para la elaboración del ensayo de masas unitarias suelta y compacta. Esta matriz experimental permitió la selección de proporción de agregados con la cual se obtenía el menor porcentaje de vacíos. Las casillas sombreadas muestran los puntos de inflexión  $\pm 10\%$  de las curvas obtenidas de la mezcla de agregados. La Figura 26 representa el porcentaje de vacíos que se consiguieron con las diferentes proporciones de mezcla seleccionadas.

Tabla 17 Proporciones de mezcla que se emplearon para la elaboración de los especímenes de prueba

MEZCLA		PROPORCIÓN (%)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Esc 1 (E1)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
B	Arena (A)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Grueso (G)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Esc 2 (E2)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
C	Arena (A)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Grueso (G)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Esc 3 (E3)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
D	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Esc 4 (E4)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
E (Blanco)	Arena (A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Grueso (G)	90	80	70	60	50	40	30	20	10

### 4.3. RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Los ensayos realizados al concreto en estado plástico fueron asentamiento, rendimiento volumétrico y peso unitario. Los resultados obtenidos para las mezclas A, B, C, D y E se encuentran en la Tabla 18.

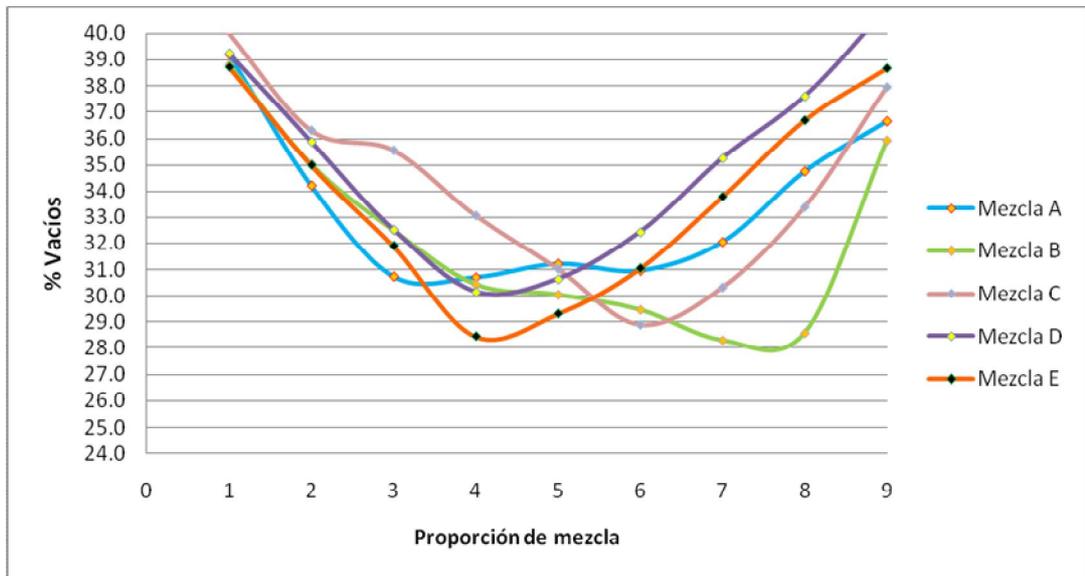


Figura 26 Porcentaje de vacíos de las diferentes proporciones de mezcla

Tabla 18 Pruebas del concreto en estado plástico para las Mezclas A, B, C, D y E.

MEZCLA		ASENTAMIENTO (cm)	RENDIMIENTO VOLUMETRICO (%)	PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> )
A	3	7.0	99	2269.0
	4	6.5	100	2299.8
	5	5.5	99	2236.0
	6	6.5	101	2222.9
B	6	7.0	101	2245.1
	7	7.0	101	2276.9
	8	6.0	101	2265.2
C	5	6.0	100	2247.3
	6	7.0	99	2280.7
	7	5.5	101	2320.3
D	3	6.5	100	2309.3
	4	6.0	100	2276.0
	5	6.0	100	2225.0
E	3	6.5	100	2312.7
	4	6.0	100	2300.0
	5	6.5	102	2300.5

#### 4.4. RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Al concreto en estado endurecido se le realizaron las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y flexión. A continuación se presentan los resultados de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días en las Tablas 19, 20 y 21.

Tabla 19 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de la Mezcla A.

MEZCLA		RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION					
		7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
		CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA
		(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
A	3	174.33	103.36	188.56	105.99	250.44	138.94
		225.18	124.93	221.80	124.68	333.58	182.67
		154.44	91.57	168.76	96.12	238.63	139.59
		196.55	116.54	308.49	162.54	236.86	124.80
		221.04	122.63	295.68	157.79	227.32	129.48
	4	243.84	128.47	281.99	152.43	387.72	209.59
		297.77	174.19	327.69	174.87	348.93	198.74
		290.93	161.40	339.80	181.34	449.43	246.11
		293.48	174.01	334.15	192.87	382.29	217.75
		278.58	144.93	310.74	165.83	448.48	245.59
	5	121.49	71.07	198.73	113.19	335.75	179.17
		222.69	118.84	186.50	109.10	220.27	127.14
		194.41	113.73	171.67	96.50	201.30	110.23
		145.65	82.96	301.11	164.89	241.61	132.31
		156.05	87.72	249.62	134.94	279.83	147.44
	6	193.73	111.82	235.21	137.59	287.92	175.42
		221.01	117.94	257.05	140.76	218.69	122.93
		219.38	121.71	245.46	141.68	243.94	148.62
		209.48	113.24	242.97	129.66	274.90	156.58
		211.21	115.66	186.12	100.61	266.02	159.88

Tabla 20 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de las Mezclas B y C.

MEZCLA		RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION					
		7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
		CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA
		(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>B</b>	<b>6</b>	175.37	91.23	179.73	105.14	262.46	138.28
		165.18	89.29	193.19	113.01	217.41	117.52
		163.83	86.32	174.88	102.30	224.59	122.99
		205.67	114.10	208.76	120.50	277.65	146.29
		148.98	84.86	197.53	112.51	215.52	124.40
	<b>7</b>	203.78	111.59	323.79	184.43	287.41	149.52
		152.29	83.40	285.88	165.01	256.78	146.26
		283.70	155.36	302.55	167.85	309.26	167.17
		244.06	131.93	258.13	153.05	242.56	140.01
		268.00	137.67	269.74	155.69	316.76	166.89
	<b>8</b>	206.38	125.74	269.95	153.76	277.05	140.55
		260.35	146.35	301.04	164.85	305.35	176.25
		215.60	124.44	231.56	130.16	256.67	138.75
		173.36	98.74	267.29	146.37	251.10	143.02
		254.51	137.58	250.70	139.09	276.08	157.25
<b>C</b>	<b>5</b>	239.75	140.25	256.34	133.36	411.75	228.43
		245.55	145.59	294.81	167.92	251.46	147.10
		253.36	150.22	284.47	155.78	259.61	151.87
		291.13	159.42	310.81	181.82	375.93	208.56
		206.77	117.77	228.26	131.75	368.71	212.82
	<b>6</b>	210.64	123.22	288.35	168.68	293.94	171.95
		290.75	157.17	308.16	175.52	289.09	158.31
		173.89	101.72	379.74	210.68	309.54	174.00
		258.53	134.50	340.48	199.17	357.07	206.10
		231.71	137.38	234.97	141.22	444.45	240.25
	<b>7</b>	277.71	156.10	204.06	111.74	318.22	174.26
		280.89	153.82	390.76	208.53	415.66	243.15
		204.40	110.49	306.17	179.10	350.76	205.19
		247.92	145.03	398.86	204.90	253.17	138.64
		309.29	160.90	351.63	208.48	314.34	163.53

Tabla 21 Resultados a compresión a los 7, 14 y 28 días de las Mezclas D y E.

MEZCLA		RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION					
		7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
		CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA	CARGA	RESISTENCIA
		(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(KN)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
D	3	204.68	115.05	184.71	105.21	312.75	162.70
		225.48	118.80	247.41	139.07	516.36	272.06
		217.75	120.81	253.04	129.99	270.38	142.46
		154.16	86.66	256.78	133.58	205.34	116.96
		172.95	99.83	215.37	124.31	287.53	155.43
	4	229.99	132.75	225.89	135.76	290.47	151.11
		230.66	131.38	184.41	107.88	228.26	130.01
		242.10	139.74	275.03	143.08	274.24	158.29
		270.87	146.42	252.33	145.65	253.40	148.23
		186.74	104.97	219.83	115.82	280.61	159.83
	5	203.50	105.87	195.20	122.25	197.29	113.88
		194.62	99.98	248.58	143.48	192.47	114.12
		182.01	106.47	181.88	107.84	251.97	137.98
		127.53	75.61	223.52	127.31	237.56	140.85
		173.69	97.63	291.03	153.34	251.47	141.35
E	3	295.94	162.06	345.02	188.94	409.09	212.82
		299.73	159.95	295.11	155.49	366.29	200.58
		286.89	155.08	365.93	197.81	417.51	219.98
		235.87	136.14	268.74	149.09	285.64	156.42
		256.95	140.71	299.66	157.88	338.97	195.65
	4	227.44	134.85	307.81	182.50	369.20	192.07
		245.09	141.47	316.99	187.95	389.90	213.51
		297.64	156.82	311.92	180.04	271.70	165.54
		311.38	164.06	282.99	167.79	362.60	214.99
		268.34	156.97	298.49	170.01	381.50	217.30
	5	293.77	156.77	321.16	175.87	315.40	189.56
		268.28	154.85	291.70	163.97	332.10	196.90
		316.33	164.56	308.23	175.56	362.50	201.11
		260.02	148.10	245.06	145.30	309.00	183.21
		270.08	155.89	329.91	185.45	308.40	178.01

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS.

A lo largo de este estudio se pudieron identificar las escombreras que son reconocidas dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga y se logro verificar el cumplimiento parcial de las normas ambientales relacionadas con el tratamiento y disposición de los escombros en nuestro medio. Así mismo, con respecto al aprovechamiento de los escombros, se desarrolló una propuesta para la elaboración de una mezcla de concreto partiendo de estos escombros como parte de los agregados. Se presentan a continuación el análisis de los resultados obtenidos.

### 5.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL REFERENTE AL TEMA DE MANEJO DE LOS ESCOMBROS EN BUCARAMANGA Y SU AREA METROPOLITANA

Con la información recopilada y con lo visto en la visita realizada a la escombrera autorizada, se puede decir que en Bucaramanga y su Área Metropolitana no existe ningún interés por parte de las empresas constructoras en implementar un programa de gestión de escombros producidos en las obras. [21], plantean que lo que se busca con un programa de gestión de escombros, es el aprovechamiento y la disminución de la contaminación mediante un tratamiento que permita la obtención de un producto técnicamente viable para utilizarlo en obras de infraestructura.



Figura 27 Vía de acceso a la escombrera

Aunque este lugar de disposición final de escombros cuenta con el permiso de funcionamiento vigente, hace falta mayor compromiso por parte de la autoridad gubernamental para mejorar las vías en las cercanías a la escombrera y un mayor control en la zona por parte de la autoridad ambiental para evitar que se sigan presentando prácticas erradas de disposición (Figura 27) por parte de personas sin conciencia ni preocupación alguna por conservar el medio ambiente.

## **5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR**

En los ensayos realizados a los agregados y escombros, cuyos resultados se presentan en la Tabla 13, se evidencia que el agregado fino obtuvo un mayor contenido de materia orgánica correspondiente al vidrio de color número 3. En cuanto a las gravedades específicas aparente, bulk SSS y bulk, el ladrillo presenta una gravedad específica menor en tamaños finos de 2.61, 2.29 y 2.09 g/cm<sup>3</sup>; y en tamaños gruesos el ladrillo presenta gravedades específicas de 2.53, 2.15 y 1.90 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Este material es refractario y se fractura fácilmente durante la manipulación del mismo, lo cual se comprueba en el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles en el que obtuvo un coeficiente de desgaste de 93.4%.

Por otro lado el escombros grueso E<sub>1</sub> obtuvo comportamientos similares al agregado grueso en los ensayos de gravedad específica, masa unitaria suelta y compacta, desgaste en la máquina de los ángeles y determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable. Así mismo, se destaca que el comportamiento del escombros fino E<sub>2</sub> fue muy similar al del agregado fino en los ensayos de masa unitaria suelta y compacta, humedad natural, gravedad específica y determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable. Esta comparación se muestra en la Tabla 24.

### **5.2.1. Densidad del cemento**

Respecto a la densidad del cemento, en la Tabla 14 se evidencia que se obtuvo un valor mínimo de 2.94 g/cm<sup>3</sup> y un valor máximo de 2.99 g/cm<sup>3</sup>. Se puede decir que estos valores se encuentran en un rango normal de valores de densidad del cemento Portland tipo 1, los cuales se encuentran entre 2.85 y 3.15 g/cm<sup>3</sup>. Se resalta entonces, que variaciones en las densidades del cemento pueden afectar los valores de la resistencia del concreto; estas variaciones normalmente son atribuidas a propiedades conferidas por la molienda del clinker.

### **5.2.2. Análisis granulométrico**

Los datos correspondientes al módulo de finura de los materiales finos, evidencia que los valores de los escombros recuperados, (E<sub>2</sub>= 2.45 y E<sub>3</sub>=2.71), corresponde al módulo de finura para agregados finos o arenas, y es un valor

cercano al valor de la arena que se tiene proveniente de río. Respecto al tamaño máximo nominal de los materiales gruesos, se observa que el escombro grueso ( $E_1$ ) obtuvo un TMN de 1" (25mm), este valor es similar al del agregado grueso, y que el TMN del escombro ( $E_4$ ) fue de 1½" (38.1mm); esto era de esperarse ya que el escombro de ladrillo fue triturado manualmente en los laboratorios.

Tabla 22 Comparación de escombros gruesos y finos con los agregados convencionales

ENSAYOS REALIZADOS		MUESTRA DE ENSAYO	
		AG. GRUESO	ESC. GRUESO
Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)		0.2	0.4
Gravedad Específica ( $g/cm^3$ )	Aparente 23/23°C	2.62	2.56
	Bulk S.S.S 23/23°C	2.58	2.36
	Bulk 23/23°C	2.55	2.24
Desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles (%)		38.0	41.3
Masa Unitaria ( $g/cm^3$ )	Suelta	1.4	1.2
	Compacta	1.5	1.3
Vacíos de MUC (%)		39.9	42.7
ENSAYOS REALIZADOS		MUESTRA DE ENSAYO	
		AG. FINO	ESC. FINO
Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)		4.4	3.0
Gravedad Específica ( $g/cm^3$ )	Aparente 23/23°C	2.69	2.57
	Bulk S.S.S 23/23°C	2.56	2.30
	Bulk 23/23°C	2.48	2.12
Humedad natural (%)		5.1	4.4
Masa Unitaria ( $g/cm^3$ )	Suelta	1.4	1.2
	Compacta	1.5	1.3
Vacíos de MUC (%)		39.9	42.7

Los datos de granulometría de los materiales gruesos (Figura 28) muestran que menos del 30% del agregado identificado E<sub>4</sub>, del cual se analizaron 3 muestras, presentan tamaños por encima del material identificado como agregado grueso, y que en general los agregados naturales y artificiales están presentando una tendencia en la granulometría con un comportamiento similar a los agregados de la muestra testigo (agregado grueso o triturado). Se observa además, que el comportamiento de los agregados gruesos es similar al comportamiento de los los valores establecidos por la NTC-174 (curva ideal).

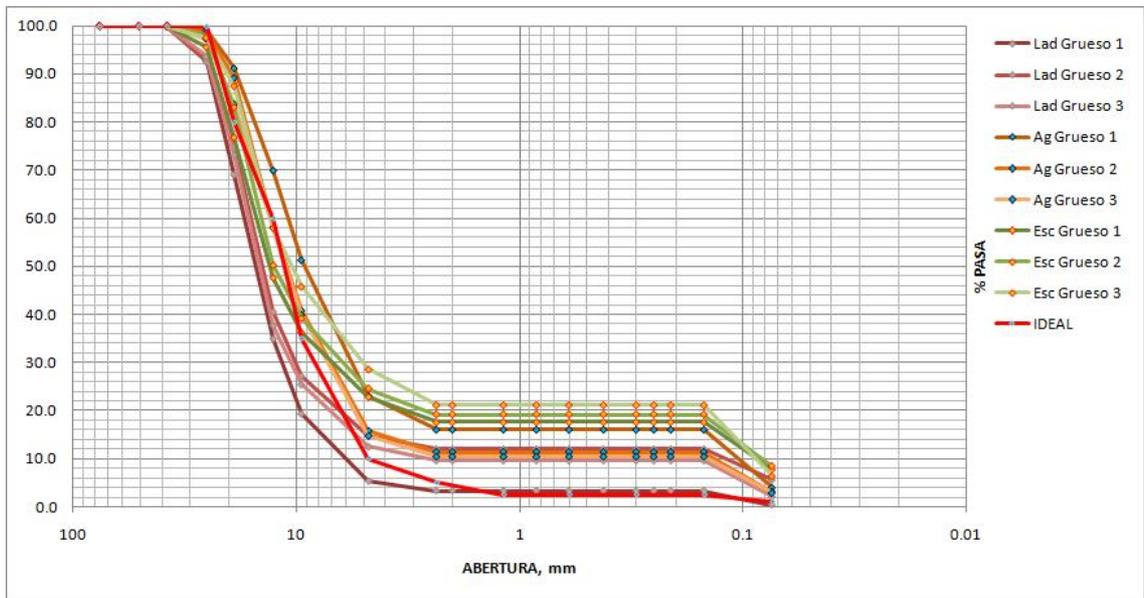


Figura 28 Curvas granulométricas del material grueso

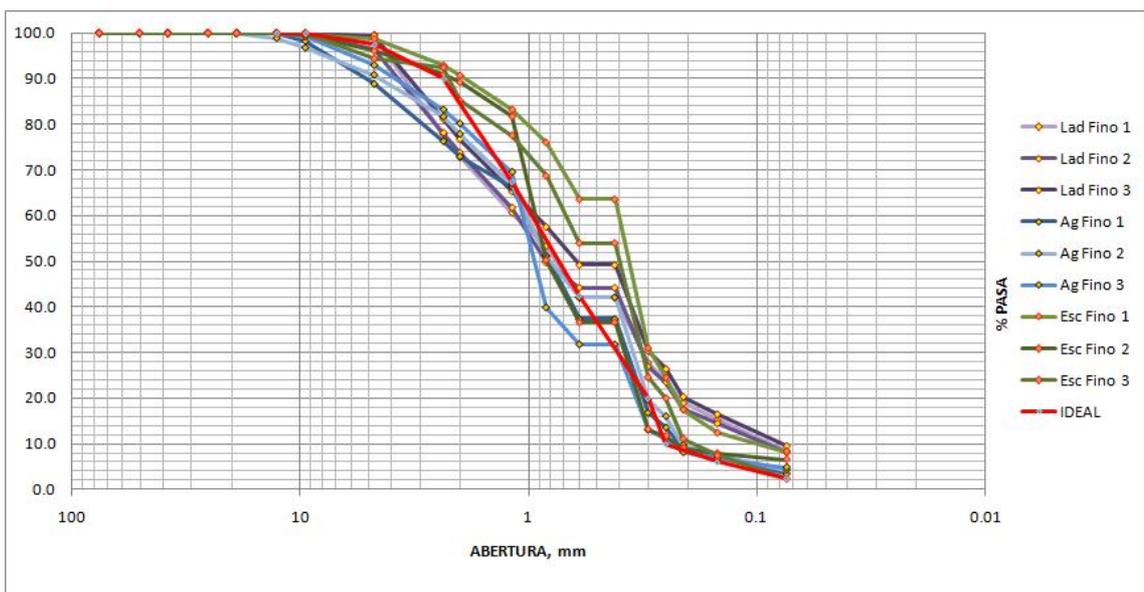


Figura 29 Curvas granulométricas del material fino

Los datos de granulometría de los materiales finos (Figura 29) muestran que el comportamiento de los agregados finos tiene una tendencia similar al comportamiento del agregado de la muestra testigo (arena o agregado fino); aunque se evidencian tamaños ligeramente mayores en las muestras provenientes de E<sub>2</sub>, que corresponden al escombro fino. Se observa además, que el comportamiento de los agregados finos es similar al comportamiento de los los valores establecidos por la NTC-174 (curva ideal).

### 5.2.3. Determinación de la mezcla de agregados con el menor porcentaje de vacíos

La matriz experimental sugerida para la elaboración de los especímenes buscaba la determinación de la mezcla que tuviera el menor porcentaje de vacíos. Los puntos de inflexión que se obtuvieron con las proporciones seleccionadas (Tabla 25) tuvieron porcentajes de vacíos que oscilaron entre 28.3 y 31%. En cuanto a trabajabilidad, se observó en forma cualitativa que las mezclas B y C presentaron un mejor comportamiento.

Tabla 23 Porcentaje de vacíos obtenidos en las diferentes proporciones de mezcla.

MEZCLA		PORCENTAJE DE VACÍOS
A	3	30.7
	4	30.7
	5	31.2
	6	31.0
B	6	29.5
	7	28.3
	8	28.6
C	5	31.0
	6	28.9
	7	30.3
D	3	32.5
	4	30.2
	5	30.6
E	3	31.9
	4	28.4
	5	29.3

### 5.3. RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Se observa que el peso unitario del concreto tuvo un valor mínimo de 2222.9 Kg/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 2320.3 Kg/m<sup>3</sup>. Estos valores corresponden a mezclas de trabajabilidad buena lo cual confirma resultados reportados en estudios de Kosmatka y otros (2004). Es importante destacar que las mezclas de concreto bien dosificadas deberían de arrojar un rendimiento de concreto del 100%. Valores diferentes pueden indicar imprecisiones en las medidas al momento de la dosificación.

Haciendo una comparación entre las mezclas de concreto B y C en donde la B y la C se estaban modificando las proporciones de los agregados convencionales, dejando constante un 10% de escombros y disminuyendo la proporción de la arena, se observa que estas mezclas arrojaron el menor y mayor valor de peso unitario obtenido en todas las batidas, es decir incluyendo los especímenes preparados de las mezclas A y E (Tabla 24). Adicionalmente, el rendimiento volumétrico de las mezclas C5 fue del 100%, y se destaca que en C5 el valor del porcentaje de grueso fue del 50%, mientras que en la E3 y E4 fue 70 y 60% de gruesos respectivamente. Se puede apreciar también que las mezclas con los agregados convencionales presentaron un rendimiento volumétrico del 100%. El peso unitario oscilo en todos los casos entre 2245.1 y 2320.3 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 24 Comparación de mezcla testigo E con mezclas B y C

MEZCLA	PORCENTAJE DE VACÍOS	RENDIMIENTO VOLUMETRICO (%)	PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> )
B6	29.5	101	2245.1
B7	28.3	101	2276.9
B8	28.6	101	2265.2
C5	31.0	100	2247.3
C6	28.9	99	2280.7
C7	30.3	101	2320.3
E3	31.9	100	2312.7
E4	28.4	100	2300.0
E5	29.3	102	2300.5

Las mezclas preparadas modificando la proporción del agregado grueso presentaron valores de peso unitario que oscilaron entre 2222.9 y 2300.5 Kg/m<sup>3</sup>. Se destaca que la mezcla D presento rendimiento volumétrico del 100% y pesos unitarios que están dentro de los valores de mezclas convencionales. La mezcla tipo A presento el menor valor del peso unitario. Se evidenciará en

análisis posteriores, que en estado endurecido la mezcla que mostró mejores resultados fue la Mezcla tipo A, seguida de la mezcla tipo C. Las Tablas 27, 28, 29, 30 y 31 contiene esta comparación.

Tabla 25 Comparación de mezcla testigo E con mezclas A y D

MEZCLA	PORCENTAJE DE VACÍOS	RENDIMIENTO VOLUMETRICO (%)	PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> )
A3	30.7	99	2269.0
A4	30.7	100	2299.8
A5	31.2	99	2236.0
A6	31.0	101	2222.9
D3	32.5	100	2309.3
D4	30.2	100	2276.0
D5	30.6	100	2225.0
E3	31.9	100	2312.7
E4	28.4	100	2300.0
E5	29.3	102	2300.5

#### 5.4. RESULTADOS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Es importante hacer un análisis de los resultados de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de cada una de las proporciones de mezcla seleccionados. En las tablas 27, 28, 29, 30 y 31 se presentan estos resultados y adicionalmente se presenta el promedio aritmético, la desviación estándar y el coeficiente de variación que se obtuvieron para cada mezcla.

Tabla 26 Normas para el control del concreto

PRODUCCION GENERAL - VARIACION TOTAL					
CLASE DE OPERACIÓN	DESVIACION ESTANDAR PARA DIFERENTES GRADOS DE CONTROL EN kg/cm <sup>2</sup> (Coeficiente de variación para diferentes grados de control en %)				
	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en campo	Menor de 25	25 – 35	35 - 40	40 - 50	Mayor de 50
	(menor de 10)	(-)	(10 - 15)	(15 - 20)	(mayor de 20)
Mezclas de prueba en laboratorio	Menor de 15	15 – 17	17 - 20	20 - 25	Mayor de 25
	(menor de 5)	(-)	(5 - 7)	(7 - 10)	(mayor de 10)

Fuente: [5]

De acuerdo a los resultados de la Tabla 27, se puede observar que la mayoría de las proporciones correspondientes a la mezcla A, obtuvieron valores de coeficiente de variación considerados como excelentes (Tabla 26). Así mismo, se puede observar que la mezcla A4 arrojó mejores resultados de resistencia a la compresión. Esto coincide con los resultados de porcentaje de vacíos, ya que fue ésta la proporción que obtuvo un 30.7%, siendo éste valor el menor que se consiguió en todas las proporciones correspondientes a la mezcla A.

Tabla 27 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla A.

MEZCLA	RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
A3	103.36	105.99	138.94
	124.93	124.68	182.67
	91.57	96.12	139.59
	116.54	162.54	124.80
	122.63	157.79	129.48
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>111.80</b>	<b>129.42</b>	<b>143.10</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>14.08</b>	<b>29.92</b>	<b>23.00</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>12.59</b>	<b>23.12</b>	<b>16.07</b>
A4	128.47	152.43	209.59
	174.19	174.87	198.74
	161.40	181.34	246.11
	174.01	192.87	217.75
	144.93	165.83	245.59
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>156.60</b>	<b>173.47</b>	<b>223.56</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>19.77</b>	<b>15.34</b>	<b>21.44</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>12.62</b>	<b>8.84</b>	<b>9.59</b>
A5	71.07	113.19	179.17
	118.84	109.10	127.14
	113.73	96.50	110.23
	82.96	164.89	132.31
	87.72	134.94	147.44
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>94.86</b>	<b>123.72</b>	<b>139.26</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>20.55</b>	<b>26.86</b>	<b>25.97</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>21.67</b>	<b>21.71</b>	<b>18.65</b>
A6	111.82	137.59	175.42
	117.94	140.76	122.93
	121.71	141.68	148.62
	113.24	129.66	156.58
	115.66	100.61	159.88
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>116.07</b>	<b>130.06</b>	<b>152.69</b>

<b>Desv. Estándar</b>	<b>3.92</b>	<b>17.13</b>	<b>19.27</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>3.38</b>	<b>13.17</b>	<b>12.62</b>

De acuerdo a los resultados de la Tabla 28, se puede observar que la mayoría de las proporciones correspondientes a la mezcla B, obtuvieron valores de coeficiente de variación considerados como excelentes (Tabla 26). Así mismo, se puede observar que la mezcla B7 arrojó mejores resultados de resistencia a la compresión. Esto coincide con los resultados de porcentaje de vacíos, ya que fue ésta la proporción que obtuvo un 28.3%, siendo éste valor el menor que se consiguió de todas las proporciones correspondientes a la mezcla B.

Tabla 28 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla B.

MEZCLA	RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
<b>B6</b>	91.23	105.14	138.28
	89.29	113.01	117.52
	86.32	102.30	122.99
	114.10	120.50	146.29
	84.86	112.51	124.40
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>93.16</b>	<b>110.69</b>	<b>129.90</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>11.97</b>	<b>7.18</b>	<b>11.94</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>12.85</b>	<b>6.49</b>	<b>9.19</b>
<b>B7</b>	111.59	184.43	149.52
	83.40	165.01	146.26
	155.36	167.85	167.17
	131.93	153.05	140.01
	137.67	155.69	166.89
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>123.99</b>	<b>165.21</b>	<b>153.97</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>27.55</b>	<b>12.40</b>	<b>12.40</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>22.22</b>	<b>7.51</b>	<b>8.06</b>
<b>B8</b>	125.74	153.76	140.55
	146.35	164.85	176.25
	124.44	130.16	138.75
	98.74	146.37	143.02
	137.58	139.09	157.25
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>126.57</b>	<b>146.85</b>	<b>151.16</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>17.97</b>	<b>13.33</b>	<b>15.81</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>14.20</b>	<b>9.08</b>	<b>10.46</b>

De acuerdo a los resultados de la Tabla 29, se puede observar que la mayoría de las proporciones correspondientes a la mezcla C, obtuvieron valores de coeficiente de variación considerados como excelentes (Tabla 26). Así mismo, se puede observar que la mezcla C7 arrojó mejores resultados de resistencia a la compresión. Respecto al porcentaje de vacíos, ésta proporción obtuvo un 30.3%; el menor porcentaje que se obtuvo fue el de la proporción C6 con un 28.9%.

Tabla 29 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla C.

MEZCLA	RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
C5	140.25	133.36	228.43
	145.59	167.92	147.10
	150.22	155.78	151.87
	159.42	181.82	208.56
	117.77	131.75	212.82
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>142.65</b>	<b>154.12</b>	<b>189.76</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>15.59</b>	<b>21.75</b>	<b>37.54</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>10.93</b>	<b>14.11</b>	<b>19.78</b>
C6	123.22	168.68	171.95
	157.17	175.52	158.31
	101.72	210.68	174.00
	134.50	199.17	206.10
	137.38	141.22	240.25
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>130.80</b>	<b>179.05</b>	<b>190.12</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>20.34</b>	<b>27.19</b>	<b>33.06</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>15.55</b>	<b>15.18</b>	<b>17.39</b>
C7	156.10	111.74	174.26
	153.82	208.53	243.15
	110.49	179.10	205.19
	145.03	204.90	138.64
	160.90	208.48	163.53
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>145.27</b>	<b>182.55</b>	<b>184.95</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>20.28</b>	<b>41.45</b>	<b>40.36</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>13.96</b>	<b>22.71</b>	<b>21.82</b>

De acuerdo a los resultados de la Tabla 30, se puede observar que todas las proporciones correspondientes a la mezcla D, obtuvieron valores de coeficiente de variación considerados como excelentes (Tabla 26). Así mismo, se puede observar que la mezcla D4 arrojó mejores resultados de resistencia a la compresión. Esto coincide con los resultados de porcentaje de vacíos, ya que

fue ésta la proporción que obtuvo un 30.2%, siendo éste valor el menor que se consiguió en todas las proporciones correspondientes a la mezcla D.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 31, se puede observar que todas las proporciones correspondientes a la mezcla E, obtuvieron valores de coeficiente de variación considerados como excelentes (Tabla 26). Así mismo, se puede observar que la mezcla E4 arrojó mejores resultados de resistencia a la compresión. Esto coincide con los resultados de porcentaje de vacíos, ya que fue ésta la proporción que obtuvo un 28.4%, siendo éste valor el menor que se consiguió en todas las proporciones correspondientes a la mezcla E.

Tabla 30 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla D.

MEZCLA	RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
D3	115.05	105.21	162.70
	118.80	139.07	272.06
	120.81	129.99	142.46
	86.66	133.58	116.96
	99.83	124.31	155.43
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>108.23</b>	<b>126.43</b>	<b>169.92</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>14.60</b>	<b>13.02</b>	<b>59.69</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>13.49</b>	<b>10.30</b>	<b>35.13</b>
D4	132.75	135.76	151.11
	131.38	107.88	130.01
	139.74	143.08	158.29
	146.42	145.65	148.23
	104.97	115.82	159.83
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>131.05</b>	<b>129.64</b>	<b>149.50</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>15.77</b>	<b>16.87</b>	<b>11.92</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>12.04</b>	<b>13.02</b>	<b>7.97</b>
D5	105.87	122.25	113.88
	99.98	143.48	114.12
	106.47	107.84	137.98
	75.61	127.31	140.85
	97.63	153.34	141.35
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>97.11</b>	<b>130.84</b>	<b>129.64</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>12.60</b>	<b>17.90</b>	<b>14.33</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>12.97</b>	<b>13.68</b>	<b>11.06</b>

Tabla 31 Resultados de resistencia a compresión de la Mezcla E.

MEZCLA	RESULTADOS DEL ENSAYO A COMPRESION (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
E3	162.06	188.94	212.82
	159.95	155.49	200.58
	155.08	197.81	219.98
	136.14	149.09	156.42
	140.71	157.88	195.65
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>150.79</b>	<b>169.84</b>	<b>197.09</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>11.68</b>	<b>21.94</b>	<b>24.70</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>7.74</b>	<b>12.92</b>	<b>12.53</b>
E4	134.85	182.50	192.07
	141.47	187.95	213.51
	156.82	180.04	165.54
	164.06	167.79	214.99
	156.97	170.01	217.30
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>150.83</b>	<b>177.66</b>	<b>200.68</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>12.16</b>	<b>8.53</b>	<b>22.11</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>8.06</b>	<b>4.80</b>	<b>11.02</b>
E5	156.77	175.87	189.56
	154.85	163.97	196.90
	164.56	175.56	201.11
	148.10	145.30	183.21
	155.89	185.45	178.01
<b>Prom. Aritmético</b>	<b>156.04</b>	<b>169.23</b>	<b>189.76</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>5.87</b>	<b>15.39</b>	<b>9.50</b>
<b>Coef. Variación</b>	<b>3.76</b>	<b>9.10</b>	<b>5.01</b>

#### 5.4.1. Comparación de los valores de resistencia máxima a los 7, 14 y 28 días para las distintas condiciones de mezcla

La Tabla 32 resume los resultados a compresión de las mezclas que obtuvieron el mayor valor de resistencia. Se destaca entonces, que frente a la mezcla testigo, la proporción de A4 presentó los mayores valores de resistencia a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 32 Resultados a compresión de las mezclas que obtuvieron mayor resistencia.

MEZCLAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
<b>D3</b> (Arena 30%; Ag. Grueso 60%; Lad. Grueso 10%)	108.23	126.43	169.92
<b>B7</b> (Arena 20%; Ag. Grueso 70%; Esc. Grueso 10%)	123.99	165.21	153.97
<b>C6</b> (Arena 30%; Ag. Grueso 60%; Lad. Fino 10%)	130.80	179.05	190.12
<b>E4</b> (Arena 40%; Ag. Grueso 60%)	150.83	177.66	200.68
<b>A4</b> (Arena 40%; Ag. Grueso 50%; Esc. Grueso 10%)	156.6	173.47	223.56

En la Tabla 34, se presentan los valores de resistencia a la compresión a los 28 días de edad que se obtuvieron en las proporciones A4, B7 y C7. Los valores de resistencia a compresión a los 28 días para las proporciones D5 y E4 son los que se esperan obtener.

### 5.5. AJUSTE A LAS PROPORCIONES DE LA MEZCLA

Una vez analizados los resultados obtenidos, se propone la preparación de una mezcla de concreto partiendo de escombros provenientes de construcción utilizando la proporción A4. Sin embargo, teniendo que los valores establecidos para el concreto estuvieron por debajo del esperado (280 kg/cm<sup>2</sup>) se recomienda la preparación de una mezcla de concreto con agregados naturales y otra con agregados reciclados, cada una de por lo menos 15 especímenes, en las cuales se preparen mezclas con A/C de 0.35, 0.40 y 0.45. De acuerdo a lo anterior, las cantidades que habría que preparar en laboratorio son:

Tabla 33 Cantidad de material para las nuevas mezclas.

MEZCLA	RELACION A/C	CANTIDAD DE MATERIAL REQUERIDO PARA PREPARAR LAS MEZCLAS (Kg/m <sup>3</sup> de concreto)				
		CEMENTO	AG. GRUESO	AG. FINO	AGUA	ESCOMBRO
A4	0.45	406.7	903.8	750.9	171.0	186.0
	0.40	457.5	880.4	731.5	171.3	181.2
	0.35	522.9	850.3	706.4	171.7	175.0
E4	0.45	406.7	1088.7	753.7	168.1	0.0
	0.40	457.5	1060.5	734.2	168.5	0.0
	0.35	522.9	1024.2	709.1	169.0	0.0

## **6. PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS ESCOMBROS.**

[21] consideran que una de las actividades más rentables en diversos países, es el desarrollo de proyectos de infraestructura. En todo proyecto de obras utiliza materiales de construcción y se generan escombros y residuos. La generación de escombros es un factor común en cualquier proyecto de infraestructura. Las autoridades ambientales han destinado sitios de acopio para estos residuos, los cuales a nivel local se han ido depositando en lugares a cielo abierto donde son compactados empleando maquinaria pesada.

El Ministerio del Medio Ambiente ha establecido que los escombros se componen de un 50% de material de albañilería (cerámico, mampuestos, etc.), un 20% de hormigón, un 10% de asfalto y un 20% de otros elementos como maderas [2]. Como es apreciable, el desarrollo de proyectos de infraestructura genera escombros de diferentes características; provenientes cada uno de ellos, de las distintas etapas constructivas [22].

Encontrar el equilibrio medioambiental es responsabilidad de todas las personas que habitan el planeta; con un interés particular por la protección de los recursos que constituyen ese ambiente. Según esto, lograr la unificación entre un procedimiento adecuado para disponer de manera correcta y un aprovechamiento comercialmente representativo de estos recursos, es una ardua labor para los ingenieros civiles. Con base en esto, [21] presentan una propuesta de un manejo integral de los residuos sólidos; principalmente de los escombros, generados durante la realización de proyectos de vivienda.

### **6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN**

[23] clasifican los residuos de acuerdo a diferentes criterios y principios, dentro de los cuales están el origen de los residuos, la posibilidad de tratamiento, la legislación ambiental vigente y/o la idiosincrasia del lugar, los residuos sólidos se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios y principios. Los escombros originados dentro de actividades de construcción y demolición forman parte de los residuos que pueden ser aprovechados en nuevas operaciones industriales. Cabe recordar que los escombros recuperados en obras deben estar descontaminados, es decir, libres de sustancias tóxicas, basura, y papel. Una buena propuesta para el aprovechamiento de arcillas, bloques, adoquines, ladrillos, mampostería, concreto simple, cerámicos y material asfáltico se establece en la Figura 30.

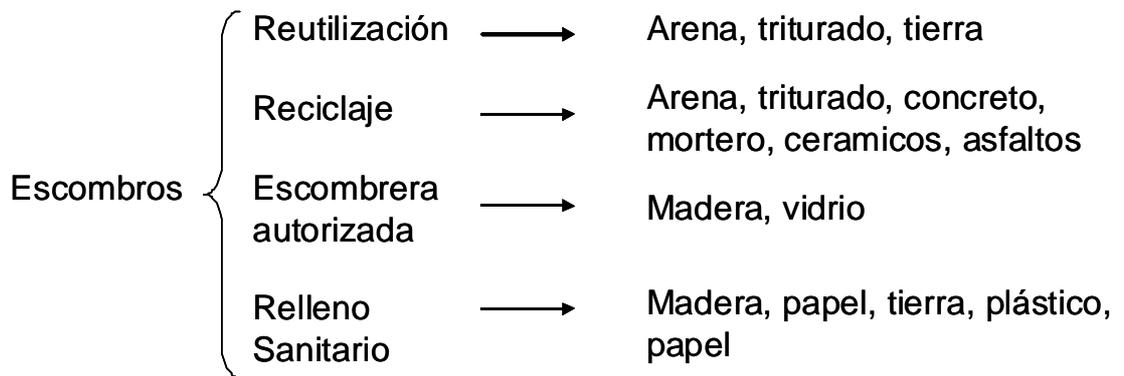


Figura 30 Propuesta para el tratamiento de escombros

Fuente: [21].

[24] cita que los residuos generados de construcción y demolición, cambian en características y volumen de acuerdo de la actividad a la cual deban su origen. Principalmente los residuos son inertes y no peligrosos, sin embargo algunas veces aparecen materiales como fibras minerales, pinturas, aceites y resinas que se clasifican como peligrosos; éstos últimos deberán separarse de los residuos que se pueden reutilizar [21].

Adicionalmente, según [24] se deben incluir dos grupos:

- La dificultad de almacenamiento del plástico y la madera en obra se debe principalmente al espacio que ocupan.
- Tierras y rocas limpias que representan alrededor del 9% de los residuos, las cuales se pueden aprovechar para relleno dentro o fuera de las obras.

Los residuos de ladrillos y revestimientos representan alrededor del 54% de la producción de residuos; el concreto como residuo tiende a ocupar alrededor del 12% en producción. Según esto, se considera que por cada 1.000 m<sup>2</sup> construidos se generan como residuos 55 m<sup>3</sup> de cerramientos, 15 m<sup>3</sup> de estructura y 50 m<sup>3</sup> de acabados. [24; 25].

## 6.2. GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN

[26] estableció que dentro del marco de todo proyecto de construcción se debe instaurar un programa de gestión de residuos de escombros como norma de carácter tipo pro-ambiental y que a su vez proporcionen alternativas de solución, viables, particulares y que puedan ser acogidas dentro del sistema con el que cuente la región.

[27], citado en [21] considera que el objetivo último de la gestión de escombros es la valorización y aprovechamiento de los residuos, a través de un

mecanismo que proporcione un producto técnicamente más viable para uso en obras civiles. Mitigando de esta manera, el impacto contaminante que se produce con la acumulación de estos residuos en terrenos potencialmente útiles, suprimiendo las canteras donde legal o ilegalmente se extraen las materias primas que serían remplazadas por el nuevo producto, siendo éste el resultado del tratamiento que se le aplicaría a los escombros. Dicho de otra manera, es la implementación de una serie de alternativas, las cuales darán un destino adecuado a los residuos; en este caso los escombros, con la meta de proteger el entorno que lo rodea.

### **6.2.1. Reducción en la generación de escombros**

[22] proponen que para disminuir la producción de escombros en obras de construcción se debe contar como mínimo, con las siguientes especificaciones:

- Contar con los equipos y herramientas adecuados según cada actividad.
- Usar el material normalizado y con las dimensiones ajustadas a las líneas arquitectónicas.
- Los espacios laborales deben contar con las condiciones de acceso, iluminación y ventilación necesarias.
- La distribución de materiales se debe realizar de manera mecanizada, asegurando un suministro óptimo, con el menor porcentaje de pérdidas de materiales y la mínima contaminación por material particulado posible.
- Las especificaciones de salud ocupacional y seguridad industrial se deben respetar y cumplir, logrando de ésta manera que todos los trabajadores adquieran los elementos de protección para la manipulación de materiales.
- Los materiales deben ser descargados de forma ordenada y su localización de se debe realizar en lugares destinados para el acopio sin pérdida alguna.

### **6.2.2. Reducción en la generación de escombros**

Las prácticas adecuadas de separación de los escombros en la fuente permiten un mayor beneficio de los materiales que son recuperados y también mejor calidad del subproducto. Para ello [21; 22] plantean algunos métodos que pueden aplicarse:

- El procedimiento de separación en la fuente debe ser metódico de modo que los materiales reutilizables no se vean contaminados ni mezclados con elementos que puedan afectar las propiedades y características para su nuevo uso.

- La separación debe realizarse a diario.
- Los materiales que no puedan ser reciclados se deben disponerse en escombreras autorizadas.

### **6.2.3. Control de escombros durante las actividades preliminares**

Parte de las actividades preliminares de la obra son localización, delimitación de áreas, descapote y ubicación; en las cuales se deben garantizar la seguridad, separación y protección para aquellos que ingresen a la obra. [21] recomienda que adicionalmente a esto, deben acondicionarse áreas destinadas al almacenamiento provisional de tierra proveniente del descapote y contenedores para almacenar el material provisional que será dispuesto de manera posterior en las escombreras.

### **6.2.4. Control de tierra útil proveniente de excavaciones**

Algunos terrenos baldíos tienen material de suelo que puede ser aprovechado para rellenos, inclusive puede ser utilizado como material para base [21]. Este material se debe almacenar garantizando el mínimo de humedad y evitando su dispersión; normalmente se acostumbra a proteger este material con plásticos. Materia que no tenga potencial para ser reutilizado, se debe retirar de la obra, mediante los equipos respectivos evitando derrames de tierra y dispuesto en escombreras autorizadas.

### **6.2.5. Control de escombros provenientes de estructuras de concreto y mortero y durante actividades de obra gris**

En obra negra es posible encontrar agregados, residuos de mezcla de concreto y mortero, pedazos de varilla, puntillas, madera, plástico. Es conveniente, por lo tanto, realizar una separación selectiva y almacenamiento adecuado de aquellos materiales que se pueden reutilizar, ejemplo de ello es el material pétreo; también los residuos metálicos que pueden ser vendidos por chatarra; o la madera que puede utilizarse para separar los hierros de las formaletas [21].

Los residuos de ladrillo y teja pueden ser depositados para ser posteriormente molidos y ajustados a tamaños convenientes para la realización de mezclas posteriores de concreto. Grandes cantidades de estos escombros pueden ser utilizados también como material base para pavimentos y áreas comunes [28].

Los restos de tuberías, cables, alambres, pegantes y residuos de soldadura se presentan en menor proporción que los escombros habituales. Se recomienda realizar la respectiva separación y almacenamiento, para que puedan ser recuperados por compañías de reciclaje, que recuperan el plástico y papel que se utiliza durante el proceso de pintura [21].

### **6.2.6. Control de escombros durante los acabados**

La actividad de acabados es la carta de presentación del constructor ante los clientes. Los escombros que se producen por procesos de pintura, instalación de revestimientos, puertas y ventanas. Pueden aparecer también residuos tóxicos como los solventes utilizados para pinturas. Este tratamiento es parecido al realizado en obra gris [21].

### **6.2.7. Control de escombros durante la limpieza en áreas de trabajo**

La limpieza es una labor diaria en todas las áreas y sitios de trabajo, y debe ser un compromiso de todas las cuadrillas en las distintas actividades. Gracias a esto, se pueden seleccionar a diario los materiales recuperables y evitar una posterior contaminación [21].

### **6.2.8. Control de aguas residuales y aguas de escorrentía**

Las obras deben tener un sistema de drenaje que garantice el manejo de las aguas de escorrentía; adicionalmente, debe proporcionarse un sistema para el almacenamiento y disposición final de las aguas residuales originadas en procesos como lavado de maquinaria, vehículos, herramientas, equipo, recipientes de almacenamiento.

Se debe tener en cuenta que el agua usada proveniente de un proyecto de construcción puede presentar un alto contenido de sólidos suspendidos y sedimentables. Puede ser recomendable, por lo tanto, dependiendo del volumen del agua, la construcción de tanques sedimentadores; éstas deben mantenerse en condiciones óptimas de limpieza para evitar la disminución del área útil de trabajo del tanque. El lodo proveniente del proceso de sedimentación se puede disponer y reutilizarse como agregado fino para mortero o concreto [21].

## **6.3. RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE ESCOMBROS EN OBRA**

Dentro de las recomendaciones y consideraciones mínimas que plantea [2] para reducir la generación de escombros en una obra de construcción, encontramos:

- Disponer de manera ordenada de un lugar en el cual se puedan ubicar los equipos y elementos necesarios para cada trabajo o actividad, reduciendo así sobrantes y basura general que sea innecesaria.
- Organizar de manera adecuada los sitios de trabajo, con las condiciones físicas necesarias, minimizando riesgos de accidentes y producción de escombros.

- Utilizar el material necesario y ajustado a las condiciones arquitectónicas para reducir la generación de retales y retazos.
- Centralizar la disposición de basuras y escombros. Así se mejoran las condiciones de seguridad y salud dentro de la obra.
- Ubicar estratégicamente los materiales necesarios donde los trabajadores tengan fácil acceso, mejorando así el rendimiento de las diferentes actividades y disminuyendo los riesgos de posibles pérdidas y derrames por transporte o accidentes.
- Suministrar el material de forma ordenada y mecanizada, de ésta manera se abastece de manera eficiente todos los frentes de trabajo y se reduce el malgasto de materiales y producción de escombros.
- Utilizar sistemas de recolección y traslado de escombros eficientes, esto mejora las condiciones de seguridad y el entorno de la obra.
- Dotar a los trabajadores de elementos necesarios y adecuados para el manejo de los materiales, con el fin que no se produzcan pérdidas en su manipulación.
- Incluir dentro de actividades como desencofrado y descimbrado ítems de limpieza y recolección de material como puntillas y clavos, formaletas y cimbras de manera que puedan ser seleccionados y clasificados para establecer si pueden o no ser reutilizados o reciclados.

## 7. CONCLUSIONES

El presente informe resume el alcance de los objetivos específicos alcanzados durante el desarrollo de este proyecto. Es decir, se localizaron las escombreras existentes en el Área Metropolitana de Bucaramanga y se revisó el cumplimiento de la normatividad ambiental dentro de estas escombreras.

Adicionalmente, se caracterizaron los residuos de construcción con el objetivo de utilizarlos como agregados en mezclas de concreto. Paralelamente, se propuso un aprovechamiento de los escombros para la elaboración de una mezcla de concreto partiendo de la reutilización de agregados reciclados. Este trabajo fue presentado en el II Simposio Iberoamericano de Residuos, en Barranquilla, y derivó en un artículo que está contemplado dentro de las memorias del evento.

Respecto a la situación actual de las escombreras y al manejo de escombros:

- En la escombrera visitada, se pudo observar que las vías de acceso no se encuentran en buen estado y requieren ser pavimentadas. Internamente, la escombrera cuenta con equipos y maquinaria para hacer la compactación del material que reciben, aunque se evidenció que a éste material no se le hace ninguna selección o separación.
- La legislación ambiental colombiana tiene disposiciones y regulaciones relacionadas con la gestión integral de residuos y de los escombros. Es responsabilidad del gobierno y de la autoridad ambiental exigir que los constructores cumplan los requisitos que establecen las leyes colombianas.
- Todo proyecto de construcción genera gran cantidad de residuos que son dispuestos en escombreras. Algunos de estos residuos pueden ser reutilizados dentro de las obras. Este aprovechamiento de escombros permite la generación de empleo.

Respecto a los materiales caracterizados

- Los escombros que se seleccionaron cumplen con las características mecánicas para ser utilizados como agregados en mezclas de concreto. Las granulometrías de los escombros gruesos ( $E_1$  y  $E_4$ ) arrojaron valores de tamaño máximo nominal de 1" (25mm) para el  $E_1$  y de 1½ (38.1mm) para el  $E_4$ ; frente al TMN de 1" (25mm) del agregado grueso. Esto quiere decir presentaron un comportamiento similar a los agregados de la muestra testigo (agregado grueso o triturado).
- Las granulometrías de los escombros finos ( $E_2$  y  $E_3$ ) arrojaron valores del módulo de finura de 2.45 para el  $E_2$  y de 2.71 para el  $E_3$ ; frente al módulo de finura de 2.82 del agregado fino. Esto quiere decir que los escombros finos

$E_2$  y  $E_3$  presentaron un comportamiento similar a los agregados de la muestra testigo (arena o agregado fino); aunque se evidenciaron tamaños ligeramente mayores en las muestras de  $E_2$ , que corresponden al escombro fino proveniente de obra.

Respecto al concreto en estado fresco

- El peso unitario del concreto en estado fresco tuvo valores que corresponden a mezclas de trabajabilidad buena. Adicionalmente, se observó que el rendimiento volumétrico de las mezclas estuvo entre 99% y 102%, a pesar de que de acuerdo al coeficiente de variación el sistema de preparación de las mezclas se considera que fue bueno.
- Es importante destacar que las mezclas de concreto bien dosificadas deberían de arrojar un rendimiento de concreto del 100%. Valores diferentes pueden indicar imprecisiones en las medidas al momento de la dosificación.

Respecto al concreto en estado endurecido

- Las mezclas que se prepararon con escombros provenientes de obra, a los que se les llamó escombros gruesos ( $E_1$ ) y finos ( $E_2$ ), fueron los  $E_1$  los que presentaron mejores resultados de resistencia a la compresión a los 7 días con un valor promedio de  $156.60 \text{ kg/cm}^2$  frente a  $123.99 \text{ kg/cm}^2$  del  $E_2$ .
- Las mezclas que se prepararon con los escombros de ladrillo, que fueron triturados manualmente y separados por el tamiz No.4 en tamaños finos ( $E_3$ ) y gruesos ( $E_4$ ), fueron los  $E_3$  los que presentaron mejores resultados de resistencia a la compresión a los 7 días con un valor promedio de  $145.27 \text{ kg/cm}^2$  frente a  $97.11 \text{ kg/cm}^2$  del  $E_4$ . Sin embargo, no se recomienda el uso del polvo de ladrillo hasta tanto se realicen pruebas de adherencia de la pasta al agregado convencional, lo cual es objeto de un estudio futuro.

Respecto a la propuesta para el aprovechamiento de escombros

- La recuperación de escombros dentro de los proyectos de construcción permite la disminución de los impactos negativos que se generan por la mala disposición de los mismos. Es indispensable que se establezcan al interior de las obras procesos de selección y caracterización de estos escombros, de manera que puedan ser recuperados y obtenerse un valor industrial por convertirse en materia prima para nuevos productos.
- Se considera que el diseño de prácticas de gestión de escombros al interior de los proyectos puede generar beneficios para las empresas constructoras, ya que pueden rehusar los materiales recuperados en la preparación de concretos. Alrededor del grupo de investigación DeCoR, liderado por la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán se van a continuar los

estudios para evaluar la calidad de los concretos que se producen con estos escombros.

Respecto a los costos de producción de concreto utilizando escombros

- A continuación, en las Tablas 34 y 35, se presenta una comparación de los costos entre la producción de concreto utilizando escombros y la producción de concreto con agregados convencionales. Cabe destacar, que los precios que se presentan, son los que se establecieron a nivel comercial en el mes de Octubre del 2009.

Tabla 34 Valor de 1m<sup>3</sup> de concreto elaborado con escombros

<b>Materiales para preparar 1m<sup>3</sup> de concreto</b>			
	m <sup>3</sup>	\$ + Transp	\$/m <sup>3</sup> concreto
Triturado	0.328	75000	24563
Arena	0.273	55000	14988
Agua	0.183	67000	12261
Escombros	0.068	28000	1890
Cemento	11 Bultos	19000	209000
			<b>\$ 262,701</b>

Tabla 35. Valor comercial de 1m<sup>3</sup> de concreto

<b>Valor comercial de 1m<sup>3</sup> de concreto</b>		
Cemex	\$	266,800
Holcim	\$	272,600

## **8. RECOMENDACIONES**

- Se debe dosificar los materiales partiendo de relaciones A/C de 0.40 y 0.35 y verificar los valores de resistencia a los 7 y 28 días.
- Se recomienda continuar este trabajo, evaluando las propiedades de adherencia de los agregados recuperados de manera que se pueda verificar con mayor precisión si el polvo de ladrillo ( $E_3$ ) puede ser utilizado como parte del agregado.
- Se recomienda utilizar el concreto obtenido para andenes y/o sardineles.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Barajas, F., Portilla, P. A., Díaz, G. Peña, J. A., Análisis del impacto ambiental generado al suelo por la disposición de escombros. Bucaramanga, pp 40, 2006.
- [2] Ministerio del Medio Ambiente, Guía técnica para el manejo de escombros en las obras de construcción, Unidad de Soporte para el control de la contaminación industrial, Bogotá, pp 32, 1995.
- [3] Alcaldía Mayor de Santa Fé de Bogotá, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), Guía técnica para el manejo de escombros de la construcción, Bogotá, pp 36, 1998.
- [4] Instituto del concreto Asocreto, Tecnologías y Propiedades, 5ta edición, Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Colombia, pp 215, 2002.
- [5] Sánchez de Guzmán, D., Tecnología del Concreto y del Mortero, 5ta edición, Bhandar Editores, Colombia, pp 349, 2001.
- [6] Kosmatka S. H., Kerkhoff B., Panarese W. C. y Tanesi J., Diseño y control de mezclas de concreto, 1era edición, Portland Cement Association, EE.UU, pp 468, 2004.
- [7] <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>, visitada el 17 de Septiembre de 2009.
- [8] Serrano M.F., Acosta M., “Evaluación económica de una microempresa de reciclaje de escombros”, 2009.
- [9] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 1713 del 06 de Agosto de 2002.
- [10] Cadena Amparo, Aspectos Técnicos en el manejo de los residuos sólidos”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995, 237p.
- [11] Olarte I., Alternativas para el tratamiento y la disposición final de los residuos generados en la industria de la construcción de vivienda y edificación, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 1999.
- [12] Palencia S., Análisis del Comportamiento Mecánico y Económico Cilindro de Concreto con Adiciones Pet Reciclado, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2007.

- [13] Dulcey L., Participación del Proceso de Producción de la Empresa Tecnopavimentos S.A., dentro del Laboratorio de Ensayos en obra, y Coordinación del Proceso de Gestión de calidad ISO 9001, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, 2008.
- [15] Serrano M.F., Ferreira J.S., Aprovechamiento de los escombros para la producción de concreto, 2009.
- [16] Matallana R., Fundamentos de concreto aplicados a la construcción, ICPC, 2006.
- [17] Invias, Norma INV E-211-07, Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable.
- [18] Invias, Norma INV E-223-07, Gravedad específica y absorción de agregados gruesos.
- [19] Invias, Norma INV E-218-07, Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1½”) por medio de la máquina de los ángeles.
- [20] Invias, Norma INV E-213-07, Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
- [21] Serrano M.F., Pérez D., Propuesta de un programa de gestión integral de escombros, 2009.
- [22] Mejía E., L. A. Hernández y M. Saza G. (2003). Proyecto de Protocolos de Residuos Sólidos “Protocolos para el manejo de escombros y materiales sobrantes de construcción”, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), Vicerrectoría, Dirección de Gestión, División de Recursos Físicos, Sistema de Gestión Ambiental, pp. 144.
- [23] Zambrano M., S. Rivera y G.Vidal. (2001). “Residuos sólidos: la realidad industrial de una país en desarrollo”, Residuos, Volumen 58, enero-febrero, pp. 108-112.
- [24] Burgueño A.(2004). “Gestión de residuos de construcción y demolición”, Residuos, Volumen 76, marzo-abril, pp. 48-56.
- [25] Páginas de información ambiental. (2005). “Nuevo destino para los escombros: Calidad Ambiental pone en marcha un Plan para gestionar correctamente los Residuos de Construcción y Demolición”, ISSN 1577-7960, Número 19,pp 16-19, disponible en la red, accesado junio 29 de 2009.
- [26] Acosta M. (2009), “Modelo alternativo de gestión de escombros Area Metropolitana de Bucaramanga”, Monografía de Especialización en Gerencia e

Interventoría de Obras Civiles, Universidad Pontificia Bolivariana (material en revisión).

[27] Bellido M. (2000). “Los escombros en la provincial de cádiz”, Residuos, Volumen 55, Julio-agosto, 2000.

[28] Wilburn D. y T. G. Goonan. (1998). “Aggregates from Natural and Recycled Sources: Economic Assessments for Construction Applications: Materials Flow Analysis”, U.S. GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 1176, publicado en la Region Central en Denver, Colorado, disponible en la red <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1176/c1176.html>, Junio, consultado Junio 9 de 2009.

## ANEXOS

### APROVECHAMIENTO DE LOS ESCOMBROS PARA LA PRODUCCION DE CONCRETO

Serrano-G. M.F.<sup>1</sup>, Ferreira J.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>[mariaf.serrano@upbbga.edu.co](mailto:mariaf.serrano@upbbga.edu.co), <sup>2</sup>[sebastian\\_ferreira23@hotmail.com](mailto:sebastian_ferreira23@hotmail.com)

Universidad Pontificia Bolivariana Km. 7 Vía Piedecuesta

#### Resumen

Se presentan resultados parciales de un proyecto de investigación en el cual se están caracterizando los materiales pétreos a ser utilizados en la preparación de una mezcla de concreto, en la que se utiliza una fracción de escombros. Se incluyen entonces, los ensayos de pruebas físico mecánicas tales como granulometría y masa unitaria, y los resultados experimentales de la distribución de vacíos con las distintas proporciones de mezcla de agregados. Con las muestras seleccionadas se prepararán testigos de concreto con agregados naturales y con mezclas de diferentes fracciones de agregado, escogiéndose para la preparación de la mezcla la fracción que arroje el menor porcentaje de vacíos  $\pm 10\%$ .

Así mismo, durante se realizó una visita a una escombrera autorizada en el Área Metropolitana de Bucaramanga, la cual aunque está cumpliendo internamente las normas ambientales para el funcionamiento, tiene unas vías de acceso que no tienen capa de rodadura lo cual permite que el material de subbase esté permanentemente expuesto (el nombre de la escombrera es reservado). Se pudo apreciar que en las inmediaciones de la escombrera, algunos transportadores de escombros descargan el material en la vía de acceso.

*Palabras clave: aprovechamiento, escombros, concreto*

#### 1. Introducción

La generación de residuos es tan antigua como el mismo hombre. Lo que ha variado a través del tiempo es la cantidad y composición química y física de los residuos, la cual está estrechamente ligada con la evolución cultural y tecnológica de la civilización [1; 2; 3], y está particularmente relacionada con el nivel de ingreso [4; 5]. El aumento de contaminación, los problemas de salud, el deterioro del espacio público, y la necesidad de soluciones ecoeficientes son algunos de los problemas identificados por la acumulación indiscriminada de residuos [6].

La actividad de la construcción genera producción de escombros provenientes de las distintas actividades que se realizan. Pedazos de cerámica, mampuestos, concreto y madera, son algunos de los residuos mas comunes. Existen centros destinados para el acopio y disposición de estos materiales, los cuales son depositados en las zonas indicadas por las autoridades ambientales. Sin embargo, la falta de conciencia cívica ha generado que se dispongan indiscriminadamente todo tipo de desechos en las escombreras causando vectores de transmisión y malos olores en algunos de los sitios autorizados.

En Colombia, aunque existe normatividad que regula la disposición de escombros, la gestión integral de los residuos de construcción ha sido muy deficiente [7]. Es responsabilidad de las autoridades ambientales generar mecanismos de control para garantizar el cumplimiento de la normatividad de las escombreras. Entre tanto, desde la academia, se puede proponer el desarrollo de tecnologías que permitan el aprovechamiento de los escombros como agregados de concreto para el desarrollo de adoquines, mampuestos, o inclusive concreto para andenes y sardineles. Este artículo presenta un avance de la investigación para el aprovechamiento de escombros en la preparación de un concreto para adoquines.

## **2. Marco Conceptual**

El término escombros se le da al material residuo de actividades como demolición, remodelación y construcción. Normalmente, los escombros se clasifican como residuos urbanos, aunque están más relacionados con una actividad industrial que doméstica [7]. La tendencia de la construcción sostenible es llegar a la búsqueda de la eficiencia y reducción de impactos desfavorables en las distintas labores de ingeniería. Se han desarrollado trabajos experimentales en los cuales se ha hecho aprovechamiento del concreto, como un residuo sólido producto de demoliciones [8; 9]. Los materiales que se reciclan pueden tener propiedades físico mecánicas que afecten la calidad, durabilidad, y resistencia del concreto que se produzca. Debe por tanto, verificarse el contenido de material arcilloso y la densidad que se alcance al compactar estos materiales y contemplar estas variables en el diseño de la mezcla de concreto [8; 9].

El esquema de las obras adelantadas dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y durante el desempeño económico e industrial de las empresas constructoras se generan escombros. Actualmente, durante el desarrollo de una obra solo un porcentaje muy bajo de estos materiales se recupera [10]. Las nuevas políticas ambientales del país, están buscando el reciclaje o el reuso para contribuir en parte a disminuir los costos ambientales por limpieza y aseo fuera de la obra [11].

Como parte del uso de los concretos, se encuentra la preparación de adoquines utilizados para pavimentos. Los pavimentos de adoquines datan de tiempos atrás pero se ha retomado la aplicación de adoquines en concreto, los cuales tienen ventajas sobre los de piedra o arcilla cocida [12]. El uso de adoquines se ha extendido a diferentes partes del mundo. Argentina, Ecuador, Colombia y Venezuela son ejemplo de países en donde el adoquín se ha aplicado debido a la versatilidad en su geometría. Gracias a esto, la colocación del adoquín permite un entrase entre elementos que permite que queden intersticios entre adoquines sin perder la fricción necesaria para la estabilidad del pavimento. Normalmente, estos intersticios se llenan con gravilla fina y corresponden alrededor de un 10 % del área total [13]. La aplicación de adoquines como pavimentos permeables representa un beneficio social, debido a la contribución de estos a mantener las condiciones naturales de una zona.

### **2.1 Concreto y materiales constitutivos**

El concreto es definido en la terminología de ASTM (C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates) como un material compuesto que consiste en un medio de enlace dentro del cual se embeben partículas o fragmentos de agregado [15]. Para ello se utiliza un cemento hidráulico, agua, triturado y arena [14].

Por cemento, según lo define la ASTM (C219 Terminology Related to Hydraulic Cement), es un material que endurece por reacciones químicas con el agua. El más conocido es el cemento Portland, el cual se produce por la pulverización de clinker que es formado por silicatos de calcio y concentraciones controladas de sulfato de calcio [14].

Por agregados, definidos según la ASTM (C 125), se entiende todo material granular como la arena, la grava, piedra triturada o residuos de hierro de los hornos, que son usados con un medio cementante para formar concretos o morteros. La proporción de agregados oscila entre 0.7 a 0.8 de la mezcla que se prepare [14]. Como se puede observar, el agregado ocupa un volumen importante del concreto, pero deben ser materiales inertes y estables [13]. La forma, textura y angularidad entre otras características del material pétreo tienen especial efecto en la resistencia y durabilidad del concreto [17].

El agua en el concreto cumple el papel de hidratar el cemento. Para la preparación del concreto y mortero se considera el uso de agua apta para consumo humano. Aguas con contenidos de sustancias químicas, con pHs ligeramente ácidos o básicos, y /o con sedimentos tienden a afectar la resistencia y/o apariencia del concreto y morteros.

## **2.2 Adoquines**

Los adoquines, piezas para pavimentos usadas por los Romanos, son elementos sólidos que tienen la habilidad de transferir cargas y esfuerzos lateralmente por la acción de la brecha entre las unidades. Estos elementos son recomendables en sitios en donde hay alto tráfico y cargas pesadas [18].

Se conoce que mientras que hacia los años 60 y comienzos de los 70 la producción de adoquines se había extendido en varios países de Latinoamérica pero se tardaron alrededor de 15 a 20 años en plantearse procedimientos para normalizar la producción de estos elementos. La mayoría de estas normas han sido adaptadas de las provenientes de Europa o Norteamérica [19]. En los últimos años se han reportado un incremento en estructuras que han presentado daños prematuros por acción de efectos agresivos del medio ambiente [20]. El agente común al cual están expuestos los adoquines, por lo menos en lo que a Latinoamérica se refiere, es a la abrasión, encontrándose que en países como Chile y Argentina deberían incorporarse pruebas que garanticen la funcionalidad de estas piezas aún en períodos de estaciones.

## **3. Metodología**

La preparación de una mezcla de concreto convencional requiere el cumplimiento de una serie de etapas previas como son la selección adecuada de los materiales y la definición de una relación agua/cemento que responda a

un asentamiento y a una resistencia de diseño. Cuando se va a preparar un concreto con un agregado no convencional se deben caracterizar los materiales para posteriormente definir aquellos que se pueden utilizar para la preparación de la mezcla. El procedimiento a seguir para diseñar una mezcla de concreto para adoquines utilizando escombros como una proporción del agregado grueso es como sigue.

### **Caracterización de los residuos**

El reconocimiento del tipo de residuos y la cuantificación de los volúmenes y composición de los mismos permite la determinación de aquellos residuos que pueden ser usados como agregados. Estos materiales se someten a ensayos de granulometría, masa unitaria, gravedad específica, resistencia química y humedad natural y absorción según las normas Técnicas Colombianas.

### **Preparación del diseño de mezcla con agregados no convencionales**

La información recopilada de masa unitaria seca y compacta de diferentes proporciones de agregado grueso y fino convencional, y las proporciones de agregado seleccionado de la escombrera son utilizadas para llevar a cabo en el laboratorio el ensayo de determinación de masa unitaria resultante de la combinación de agregados según la mezcla en proporciones de cada uno. Se escoge la mezcla de agregados que proporcione la menor relación del porcentaje de vacíos. Con esta mezcla de agregados, y partiendo de un asentamiento seleccionado se procederá a la preparación de los especímenes correspondientes, en una producción total de 280 cilindros sobre cuyos resultados se evaluarán.

El diseño de la mezcla se hará considerando un diseño para pavimento. Específicamente se concentrará la aplicación del concreto para la preparación de adoquines. Para ello se requiere conocer el tamaño máximo del agregado, el módulo de finura, la humedad de los agregados, la masa unitaria seca y compacta, la relación agua-cemento, los contenidos de agua y cemento, las condiciones de exposición del elemento y la resistencia.

### **Preparación de adoquín**

El adoquín se preparará atendiendo a la Norma Icontec 2017. Esta norma establece que el adoquín debe tener una resistencia a la flexo-tracción superior a los 47 km/cm<sup>2</sup> en promedio y ningún resultado individual debe ser inferior a 37 km/cm<sup>2</sup>. El hormigón recomendado debe tener agregados gruesos con diámetro entre 4.76 cm y 12.7 cm, en una proporción mínima del 30% del contenido total de agregados [21]. Los adoquines deben someterse a pruebas de compresión, abrasión, deslizamiento y absorción de agua.

### **Pruebas mecánicas a compresión y flexión de muestras de cilindros**

Se prepararán especímenes para determinar la resistencia a compresión y a flexión de las muestras testigo. Los cilindros tendrán las dimensiones estandarizadas de la norma NTC-673 (30x10cm).

#### **4. Resultados**

El desarrollo de este trabajo ha permitido conocer las escombreras del Área Metropolitana de Bucaramanga. Así mismo, el visitar obras en las cuales se está haciendo reciclaje y aprovechamiento de escombros para uso dentro de la misma obra. También se ha logrado caracterizar los escombros recolectados en las visitas de las obras. De acuerdo a lo anterior, se presentan resultados parciales.

##### **4.1 Visita a la escombrera**

Inicialmente se propuso visitar las escombreras autorizadas en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Solamente fue permitido el acceso a una de ellas, y a solicitud del administrador no se divulgará su nombre.

Se observó que internamente, la acomodación de los escombros se hace utilizando maquinaria pesada. No existe balanza (o estación de pesaje) al ingreso a la escombrera, y el control de escombros se hace por metro cúbico de la volqueta que transporta el escombros. Para recibir el escombros el conductor debe llevar el recibo de pago por derechos de disposición en la escombrera. Se puede mejorar el sistema de disposición para lograr un funcionamiento eficiente de la escombrera; también se deben mejorar las vías de acceso para que no se genere una acumulación no adecuada de los escombros a lo largo de la vía exterior.



**Figura 1.** Maquinaria pesada para la acomodación del material que se recibe en la escombrera

**Fuente:** Juan Sebastián Ferreira, 2009

## 4.2 Caracterización de los materiales

El material a caracterizar estaba conformado por arena (A) del río Pescadero, agregado grueso (G) de la Trituradora La Estrella, escombros seleccionados de dos obras de la Empresa Marval que fueron cualitativamente clasificados como grueso ( $E_1$ ) y fino ( $E_2$ ) y muestra de ladrillo que fueron recolectadas y trituradas en tamaños finos ( $E_3$ ) y gruesos ( $E_4$ ). Se realizaron los siguientes ensayos (Tabla 1) en donde se evidencia que el módulo de finura de los escombros recuperados ( $E_2$  y  $E_3$ ) corresponde al módulo de finura para arenas finas, y es un valor cercano al valor de la arena que se tiene proveniente de río.

En cuanto a las gravedades específicas, se observa que el ladrillo presenta una gravedad específica menor en todos los casos ( $E_3$  y  $E_4$ ). Este material es refractario y se fractura fácilmente durante la manipulación del mismo, lo cual se comprueba en el ensayo de la máquina de los ángeles. Por otro lado, el escombro  $E_4$  tiene una gravedad específica similar a la del agregado grueso G. Así mismo, se destaca que el comportamiento del agregado fino A es muy similar al comportamiento del  $E_3$ . y que porcentaje de vacíos de los distintos materiales estuvo entre el 38 y 42% que son valores usuales del material pétreo.

**Tabla 1.** Ensayos realizados al material

ENSAYOS REALIZADOS		MUESTRA DE ENSAYO						NORMA
		AG. FINO	ESC. FINO	LAD. FINO	AG. GRUESO	ESC. GRUESO	LAD. GRUESO	
Humedad natural (%)		5.1	4.4	5.0	1.2	4.1	2.4	
Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)		4.4	3.0	1.8	0.2	0.4	0.3	INV E-211-07 NTC 589
Contenido aprox. de materia orgánica.		3	1	0	-	-	-	INV E-212-07 NTC 127
Gravedad Específica (g/cm³)	Aparente 23/23°C	2.69	2.57	2.61	2.62	2.56	2.53	INV E-222-07
	Bulk S.S.S 23/23°C	2.56	2.30	2.29	2.58	2.36	2.15	INV E-223-07
	Bulk 23/23°C	2.48	2.12	2.09	2.55	2.24	1.90	NTC 237
Porcentaje de absorción (%)		3.1	8.1	9.6	1.1	5.6	13.1	NTC 176
Desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles (%)		-	-	-	38.0	41.3	93.4	INV E-218-07 NTC 98
Masa Unitaria (g/cm³)	Suelta	1.5	1.2	1.2	1.4	1.2	1.0	INV E-217-07
	Compacta	1.6	1.3	1.3	1.5	1.3	1.1	
Vacíos de MUC (%)		38.2	38.5	38.4	39.9	42.7	41.5	NTC 92

### 4.3 Comparación de las curvas granulométricas de los distintos materiales

Los datos de granulometría de los materiales gruesos (Figura 2) muestran que menos del 30% del agregado identificado E<sub>4</sub>, del cual se analizaron 3 muestras, presenta tamaños por encima del material identificado como G, y que en general los agregados naturales y artificiales están presentando una tendencia en la granulometría con un comportamiento similar a los agregados de la muestra testigo G. Los datos de granulometría de los materiales finos (Figura 3) muestran que el comportamiento de los agregados finos tiene una tendencia similar al comportamiento del agregado de la muestra testigo A, aunque se evidencian tamaños ligeramente mayores en las muestras provenientes de E<sub>3</sub>, que corresponden al escombro de ladrillo fino.

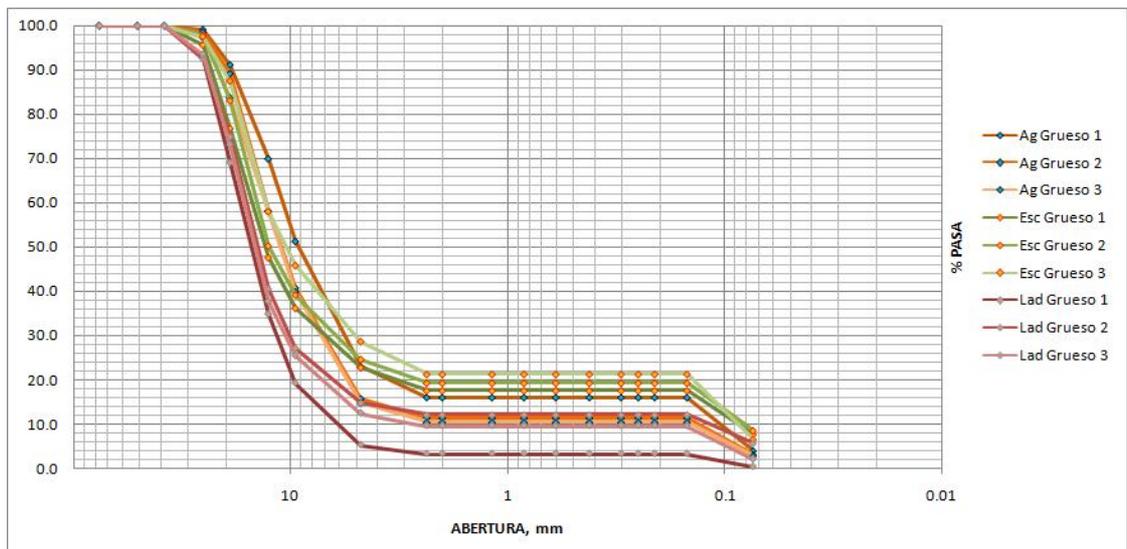
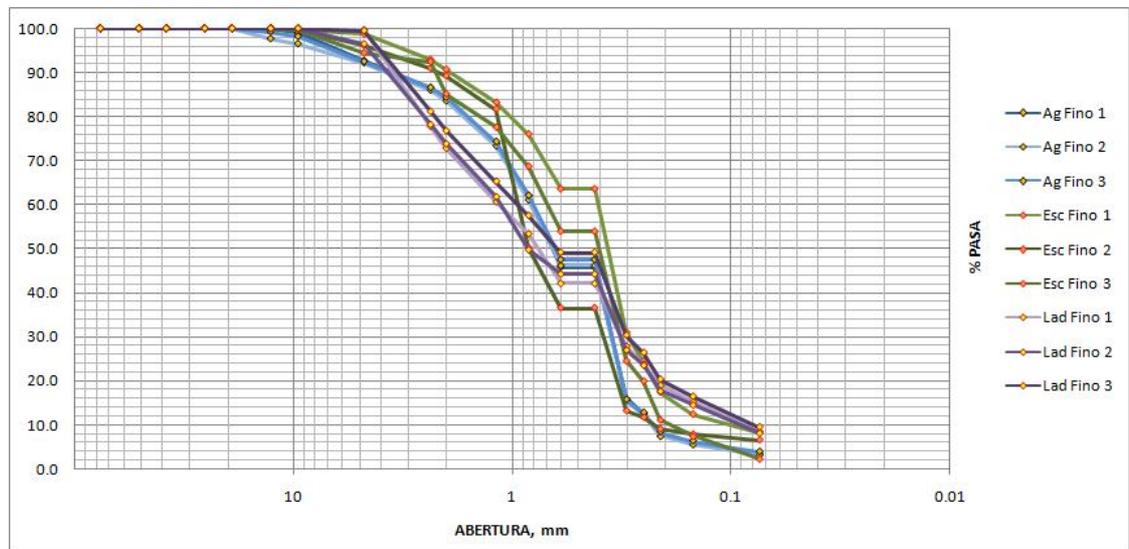


Figura 2. Curvas granulométricas del material grueso



**Figura 3.** Curvas granulométricas del material fino

#### 4.4 Comparación de los porcentajes de vacío obtenidos con las distintas proporciones de mezclas de los agregados

Se prepararon 4 mezclas de materiales pétreos más una mezcla que se denominó testigo (Figura 4). La descripción corresponde a la siguiente notación:

Mezcla de agregados A: corresponde a mezclas de agregados con Arena (A), Grueso (G) y fracciones de Escombros  $E_1$ .

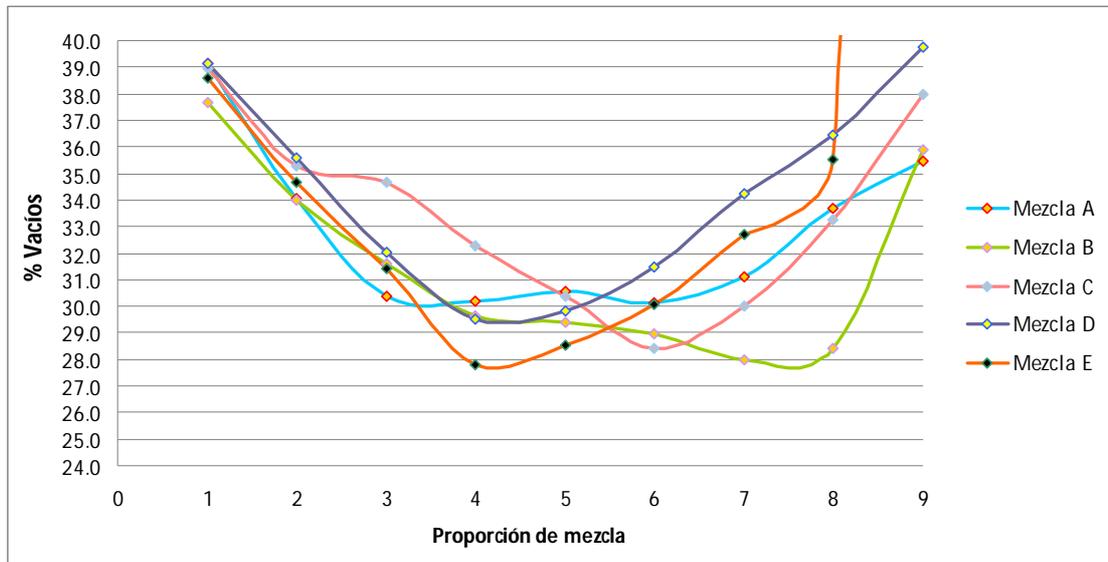
Mezcla de agregados B: corresponde a mezclas de agregados con Arena (A), Grueso (G) y fracciones de Escombros  $E_2$ .

Mezcla de agregados C: corresponde a mezclas de agregados con Arena (A), Grueso (G) y fracciones de Escombros  $E_3$ .

Mezcla de agregados D: corresponde a mezclas de agregados con Arena (A), Grueso (G) y fracciones de Escombros  $E_4$ .

Mezcla de agregados E: corresponde a mezclas de agregados con Arena (A) y Grueso (G).

Para el diseño de la mezcla de concreto, el criterio es seleccionar la mezcla de agregados que proporcione el menor porcentaje de vacíos más o menos un 10%. Con todos los agregados se determinó el porcentaje de vacíos de la mezcla.



**Figura 4.** Porcentaje de vacíos de las distintas mezclas de agregados

Se destaca que la mezcla de agregados reduce el porcentaje de vacíos del material pétreo.

## 5. Conclusiones

- Se realizó visita de reconocimiento a las escombreras del Área Metropolitana de Bucaramanga. Es importante destacar que solamente se permitió el acceso a una sola de ellas, y que se solicitó mantener confidencial el nombre de la empresa. En la escombrera visitada, se pudo observar que las vías perimetrales requieren de pavimentación. Internamente, la escombrera cuenta con los equipos y maquinaria para hacer la compactación del material que reciben, aunque se evidenció que no se hace selección del material entrante.
- Los escombros que se aprovecharon cumplen las características mecánicas para ser utilizados como agregados en mezclas. La preparación de las muestras testigo de concreto se ejecutará en cuanto se terminen los ensayos químicos de estos agregados.
- Existe una matriz experimental desarrollada para realizar mezclas de concreto a ser ensayadas y con la mezcla que arroje el mejor comportamiento se prepararán adoquines. Esta es una alternativa de aprovechamiento de escombros, genera empleo y mitiga factores ambientales externos de alteración al paisaje.

## 4. Referencias

- [1] Cadena Amparo, Aspectos Técnicos en el manejo de los residuos sólidos”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995, 237p.
- [2] Dominique de Suremain Marie, “La participación de las organizaciones no gubernamentales en el manejo de los residuos sólido y el reciclaje”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995, 237p.
- [3] Jaramillo G.A., “Que nada ni nadie sea desecho: Aspectos educativos en el manejo de residuos sólidos”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995, 237p.
- [4] Murillo Espólito, “Aspectos sociales y organizativos en el manejo de los residuos sólidos”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995a, 237p.
- [5] Leroy J.B., “Guía para la elaboración de un proyecto de tratamiento de residuos urbanos”, Residuos , Volumen 82, julio-agosto, 2005, pp. 46-64.
- [6] Pacheco Montes M, “El manejo de residuos sólidos integrado a la planeación municipal”, Hacia un Pacto Limpio, Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, 1995a, 237p.
- [7] Olarte I., Alternativas para el tratamiento y la disposición final de los residuos generados en la industria de la construcción de vivienda y edificación, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 1999.
- [8] Palencia S., Análisis del Comportamiento Mecanico y Económico Cilindro de Concreto con Adiciones Pet Reciclado, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2007.
- [9] Dulcey L., Participación del Proceso de Producción de la Empresa Tecnopavimentos S.A., dentro del Laboratorio de Ensayos en obra, y Coordinación del Proceso de Gestión de calidad ISO 9001, Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, 2008.
- [10] Barajas F., A. Portilla y G. Peña, Análisis del impacto ambiental generado a lsuelo por la disposición de escombros, 2008).
- [11] Alcaldia Mayor de Santa Fe de Bogota, DAMA, Guia Tecnica para el Manejo de Escombros de la Construcción, 1995.
- [12] Gordillo T., Diseño y Construcción de Calles Urbanas, Revista Vial, Volumen 46, Noviembre-Diciembre, 2005.

- [13] Fernandez B., P. Rivera y J. P. Montt, Con Bajo Impacto Hidrológico Ambiental: Uso de Pavimentos Permeables, Revista BIT, Noviembre, pp. 54-56, 2003.
- [14] ASTM, Editores Klieger P. y J. F. Lamond, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, pp. 630, 1994.
- [15] Carino N.J., Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges, American Concrete Institute, ACI SP-144, Detroit, MI, 1994. pp. 623-678.
- [16] Muñoz J. y L. R. Sarmiento, "Evaluación técnico-económica del uso del concreto reciclado en la construcción de obras civiles", Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, 2005.
- [17] Al-Rousan T., E. Masad, E. Tutumluer y T. Pan, "Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, Construction and Building Materials, Volumen 21, pp. 978-990, 2007.
- [18] <http://www.besser.com/>, disponible en la red, consultada en Junio 19 de 2009.
- [19] ICPC, Madrid German G., Normas y Especificaciones para Adoquines de Concreto en Países Latinoamericanos, Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Publicación 1258, Serie 5, Número 336, Medellín, 1992.
- [20] Vergara L., R. Miralles R., J. Gosalbez, F.J. Juanes, L. Gómez-Ullate, J.J. Anaya, M. Gonzalez H., y M.A. Garcia I., On estimating concrete porosity by ultrasonic non-destructive testing, International Congress on Acoustic (17th ICA), Rome, Septiembre, 2001. Disponible en la red en <http://hdl.handle.net/10261/5628>. Consultado el 24 de marzo de 2009.
- [21] Madrid G. y L. Pelaez, La Mampostería de Concreto en la Vivienda de Interés Social en Colombia, Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Volumen 558, serie 5, Número 558, 1994.