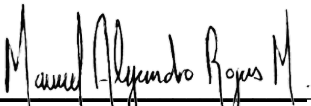


APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN EN CONCRETOS NO ESTRUCTURALES  
FABRICADOS EN OBRA: ESTUDIO DE CASO.

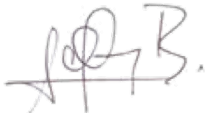
NICOLÁS MARTÍNEZ OSORIO

Nota de Aceptación


Certificamos que el presente Trabajo de Grado  
Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos  
Que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.

  
MANUEL ALEJANDRO ROJAS  
Director

  
IVAN OTALVARO CALLE  
Jurado

  
ANYBAL MAURY  
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la  
Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de  
Magister en Ingeniería Civil.

  
HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.  
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

  
JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS  
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali 17 de marzo del 2021

**Maestría en Ingeniería  
Facultad de Ingeniería y Ciencias**



**Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado**

**Santiago de Cali, 17 de marzo del 2021**

**Autor: Nicolás Martínez Osorio**

**Título del Trabajo de Grado: “APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN EN CONCRETOS NO ESTRUCTURALES FABRICADOS EN OBRA: ESTUDIO DE CASO”.**

**Director: Manuel Alejandro Rojas Manzano**

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.

A handwritten signature in black ink, reading 'Manuel Alejandro Rojas M.', written over a horizontal line.

Firma del Director del Trabajo de Grado

## **Autor**

**Nombre:** Nicolás Martínez Osorio

**Dirección:** Calle 13B # 75-69 Cali- Colombia

**Teléfono de contacto:** +57 315 353 00 00

**Correo electrónico:** [nicomaoso@gmail.com](mailto:nicomaoso@gmail.com)

**Profesión:** Ingeniero Civil

**Universidad:** Pontificia Universidad Javeriana Cali



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN EN  
CONCRETOS NO ESTRUCTURALES FABRICADOS EN OBRA: ESTUDIO DE CASO**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

**NICOLÁS MARTÍNEZ OSORIO**

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Marzo de 2021.

## **Dedicatoria**

*A Dios, por permitirme cumplir cada sueño y meta.*

*A mis padres Rodrigo y Patricia por sus valores, apoyo, motivación, amor y refugio.*

*A María José por su amor incondicional y apoyo.*

*A mi hermano Sebastián por guiarme y aconsejarme en cada etapa de mi vida.*

*Gracias familia, no lo hubiera logrado sin ustedes.*

## **Agradecimientos**

*A la Pontificia Universidad Javeriana, por permitir ser parte de sus programas de pregrado y posgrado. También por brindarme todos los valores y conocimiento adquirido durante todos estos años. Estaré eternamente agradecido.*

*Al Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano, por su inmensa dedicación, paciencia, motivación, respeto y conocimiento impartido durante el desarrollo de este proyecto. Su apoyo fue fundamental en este proceso.*

*Al personal del laboratorio, en especial a Erlo Travi y el semillero de investigación en materiales de construcción MATCON.*

*A la Constructora Bolívar, en especial a la Ingeniera Marcela Restrepo por su gestión incondicional en cada etapa desarrollada de este proyecto. Su apoyo fue trascendental.*

*A mi gran compañero Daniel Medina por su apoyo y motivación para iniciar con este proceso.*

*Y en general, a cada uno de las personas que participaron directa e indirectamente en esta investigación. No hubiera sido posible sin su ayuda.*

## RESUMEN

La población mundial debido a su crecimiento constante, se encuentra con numerosos desafíos en lo que se refiere acceso a servicios básicos, necesidad de aumento en la infraestructura y construcción, cuidado en el medio ambiente y la gestión de los residuos sólidos. Siendo la última, un deber en el cual los seres humanos tenemos que estar involucrados en su totalidad. Por ende, es una problemática que se tiene que abordar, debido que anualmente se generan millones de toneladas de residuos. En Colombia, se adoptaron políticas de reutilización, mediante la Resolución 0472 de 2017 que tiene como objeto la gestión integral de residuos de demolición y construcción (RCD) por parte de los diferentes involucrados que intervienen en la industria de la construcción, transporte, aprovechamiento y disposición final de los RCD. La resolución, que tiene como meta el aprovechamiento inicial en obra del 2% en peso total de los materiales usados en obra para el año 2018 y subirá dos puntos porcentuales anualmente, hasta llegar al 30%. Además, dependerá del tipo de generador y la categoría del municipio.

El presente trabajo, el cual es un estudio de caso, tiene como objetivo general, evaluar la alternativa de aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción como agregados para la elaboración de concretos no estructurales. Se ejecutó en un proyecto de vivienda de interés prioritario (VIP) llamado Paisaje de Las Flores ubicado en el municipio de Jamundí, de la constructora Bolívar. El sistema constructivo es en mampostería estructural en bloques de arcilla cerámica, las casas son de dos pisos y tienen un área construida de 41,36 m<sup>2</sup>.

La metodología, consiste en: la selección y análisis del proyecto, la evaluación, la generación del RCD, la fabricación del Agregado Reciclado (AR) y la elaboración de los concretos no estructurales con Agregado Reciclado Cerámico (ARC) en obra y laboratorio, para finalmente realizar el análisis de los resultados obtenidos. Los resultados de la caracterización muestran que los ARC, cumplen con algunas especificaciones normativas. Sin embargo, en propiedades como durabilidad, realizada en la máquina de los Ángeles, no cumple. Adicionalmente, es importante tener en cuenta 16,82% de absorción por lo que resulta necesario tener un ajuste de humedad previamente al proceso de fundición. Finalmente, se puede concluir que fue posible elaborar concretos no estructurales con el 20% de reemplazo con ARC sin comprometer las propiedades mecánicas.

## **Abstract**

Due to its constant growth, the world population faces numerous challenges in terms of access to basic services, the need to increase infrastructure and construction, care for the environment and solid waste management. Being the last, a duty in which human beings have to be fully involved. Therefore, it is a problem that must be addressed, since millions of tons of waste are generated annually. In Colombia, reuse policies were adopted, through Resolution 0472 of 2017, which aims at the comprehensive management of demolition and construction waste (RCD) by the different stakeholders involved in the construction, transportation, utilization and final disposition of the RCD. The resolution, whose goal is the initial use on site of 2% by total weight of materials used on site for the year 2018 and will increase two percentage points annually, until reaching 30%. In addition, it will depend on the type of generator and the category of the municipality.

The present work, which is a case study, has the general objective of evaluating the alternative of using ceramic construction waste as aggregates for the elaboration of non-structural concretes. It was executed in a housing project of priority interest (VIP) called “Paisaje de las Flores” located in the municipality of Jamundí, of the Bolívar construction company. The construction system is in structural masonry in ceramic clay blocks, the houses are two-story and have a constructed area of 41,36 m<sup>2</sup>.

The methodology consists of: the selection and analysis of the project, the evaluation, the generation of the RCD, the manufacture of the Recycled Aggregate (AR) and the elaboration of non-structural concretes with Recycled Ceramic Aggregate (ARC) in work and laboratory, to finally carry out the analysis of the results obtained. The results of the characterization show that the ARCs meet some normative specifications. However, in properties such as durability, made in the Los Angeles machine, it does not comply. Additionally, it is important to take into account 16,82% absorption, which is why it is necessary to have a humidity adjustment prior to the casting process. Finally, it can be concluded that it was possible to make non-structural concretes with 20% replacement with ARC without compromising the mechanical properties.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Total, producción de RCD, panorama mundial. ....	7
Tabla 2. Problemas principales en la gestión de RCD en Colombia. ....	10
Tabla 3. Clasificación RCD en la Resolución 0472 2017. ....	11
Tabla 4. Clasificación de RCD en sus diferentes categorías. ....	12
Tabla 5. Índice de generación volumétrico .....	14
Tabla 6. Índice generación gravimétrico.....	14
Tabla 7. Normatividad Básica RCD en Colombia.....	15
Tabla 8. Alternativas de aprovechamiento dependiendo el residuo.....	17
Tabla 9. Ensayos realizados al Agregado reciclado.....	32
Tabla 10. Ensayos empleados en agregados finos, gruesos y cemento. ....	32
Tabla 11. Dosificación suministrada por la Constructora Bolívar.....	38
Tabla 12. Materiales y equipos solicitados para fundición.....	39
Tabla 13. Descripción y nomenclatura de especímenes de concreto.....	42
Tabla 14. Diseño de mezclas para fabricación concretos de referencia.....	48
Tabla 15. Módulo de finura, tamaño máximo nominal y tamaño máximo de los agregados.....	50
Tabla 16. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados finos (natural y ARC).....	53
Tabla 17. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (natural y ARC).....	54
Tabla 18. Resultado promedio: Densidad Bulk de los ARC finos. ....	54
Tabla 19. Ubicación y tipos de concretos fabricados.....	55
Tabla 20. Asentamiento de los diferentes concretos elaborados. ....	56
Tabla 21. Resultados a compresión con curado en inmersión.. ....	57

Tabla 22. Resultados a compresión con curado al aire.. .....	59
Tabla 23. Índice de rebote promedio en la edad de 7 y 28 días. ....	60
Tabla 24. Resultados asentamientos de concretos fabricados en laboratorio.. .....	63
Tabla 25. Resultados a compresión con curado en inmersión.. .....	64
Tabla 26. Índice de rebote promedio en la edad de 7 días.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos por actividad económica. ....	6
Figura 2. Metodología empleada.. ....	21
Figura 3. Localización general del proyecto. (a) mapa del Valle del Cauca, (b) municipio de Jamundí y (c) Ubicación proyecto Paisaje de las Flores. Fuente: Google Earth. ....	22
Figura 4. Planta arquitectónica de casa tipo. Fuente: Constructora Bolívar. ....	22
Figura 5. Planta urbana. Fuente: Constructora Bolívar. ....	23
Figura 6. Sistema estructural Paisaje de las Flores. (a) Instalaciones hidrosanitarias, (b) Losa de cimentación, (c) Instalación de mampostería estructural y (d) vivienda terminada.....	24
Figura 7. Residuos en cortadora de banco en Paisaje de las Flores.. ....	25
Figura 8. Generación residuos en sitio. ....	26
Figura 9. Identificación de elementos no estructurales. ....	27
Figura 10. Residuo cerámico característico proveniente obra Paisaje de las Flores. (a) Residuo en sacos proveniente de obra, (b) Residuo característico. ....	29
Figura 11. Proceso de trituración mediante trituradora de mandíbulas laboratorio PUJ. ....	30
Figura 12. Separación del agregado reciclado mediante tamizadora mecánica. (a) Tamizadora mecánica, (b) se ingresó el material no tamizado, (c) proceso de separación mediante malla # 4 y (d) material fino tamizado.....	31
Figura 13. Ensayos de densidad Bulk en estado suelto y compacto. (a) Agregado grueso del RCD y (b) Agregados finos del RCD.. ....	33
Figura 14. Granulometría. (a) Separación material y (b) Tamizado.....	34
Figura 15. Ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados finos. (a) Prueba del cono, (b) extracción de aire de las muestras y (c) Peso seco del material fino reciclado. ....	35
Figura 16. ensayo de resistencia al desgaste mediante la Máquina de los Ángeles.....	36
Figura 17. Frascos sumergidos en baño de agua para estabilización de temperatura.....	37

Figura 18. Consistencia del concreto de referencia bajo diseño inicial..	40
Figura 19. Proceso de fundición ARC. (a) evidencia la dosificación del ARC con un porcentaje de incorporación del 33%, (b) proceso de mezclado, (c) transporte del concreto, (d) y (e) vaciado del concreto y (f) texturizado del concreto..	41
Figura 20. Especímenes de concreto en estado fresco..	42
Figura 21. Marcación de especímenes en diferentes condiciones y porcentajes de incorporación de ARC..	43
Figura 22. Ensayo de asentamiento bajo norma NTC 396..	44
Figura 23. Ensayo de compresión. (a) registro de masa, (b)registro de diámetros, (c) y (d) ensayo en ejecución, (e) espécimen ensayado y (f) recolección de especímenes ensayados .....	45
Figura 24. Esclerometría. (a) Toma de ensayo y (b) preparación de la superficie. ....	46
Figura 25. Materiales utilizados en fundición. (a) saturación previa del ARC, (b) agregado fino, (c) agregado natural grueso y (d) cemento de uso general..	47
Figura 26. (a) ensayo de asentamiento, (b) ensayo de resistencia a compresión, y (c) ensayo de esclerometría..	49
Figura 27. Curva Granulométrica agregado grueso..	51
Figura 28. Curva Granulométrica agregado fino..	52
Figura 29. Curva Granulométrica ARC..	52
Figura 30. (a) Asentamiento concreto de referencia, (b) asentamiento concreto 10% reemplazo ARC, (c) asentamiento concreto 20% reemplazo ARC y (d) asentamiento concreto 33% reemplazo..	56
Figura 31. Resistencia a compresión de los diferentes concretos elaborados en obra y con curado en inmersión..	58
Figura 32. Resistencia a compresión de los diferentes concretos con curado al aire. .	59
Figura 33. Índice de rebote vs resistencia a compresión: curado en inmersión..	61
Figura 34. Índice de rebote vs resistencia a compresión: curado al aire..	62

Figura 35. (a) asentamiento concreto de referencia y (b) asentamiento concreto con 20% de incorporación de ARC.....	63
Figura 36. Resistencia a compresión de los concretos de referencia y 20% de reemplazo de ARC en condiciones de curado en inmersión.....	64
<i>Figura 37. Índice de rebote vs resistencia a compresión.....</i>	<i>66</i>
Figura 38. Índice de rebote vs resistencia a compresión de concretos fabricados en obra y laboratorio.....	67

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Densidad bulk fino reciclado.....	76
Anexo 2. Densidad bulk grueso reciclado..	77
Anexo 3. Granulometría agregado fino.....	78
Anexo 4. Granulometría agregado grueso..	79
Anexo 5. Granulometría ARC .....	80
Anexo 6. Gravedad específica Fino RCD.....	81
Anexo 7. Gravedad específica arena fundición..	82
Anexo 8. Gravedad específica grueso RCD.....	83
Anexo 9. Gravedad específica grava fundición..	83
Anexo 10. Peso específico del cemento.....	84
Anexo 11. Resistencia al desgaste del agregado reciclado.....	85
Anexo 12. Humedades fundición obra.....	86
Anexo 13. Humedades fundición laboratorio..	86
Anexo 14. Resultados de resistencia a compresión concreto convencional en obra..	87
Anexo 15. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 10% ARC en obra.....	87
Anexo 16. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 20% ARC en obra.....	88
Anexo 17. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 33% ARC en obra.....	88
Anexo 18. Resultados de resistencia a compresión para concretos fabricados en laboratorio.....	89
Anexo 19. Rendimiento trituradora con material reciclado cerámico en estado seco..	90

Anexo 20. Rendimiento trituradora con material cerámico en estado húmedo..... 92

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Pregunta de investigación .....	3
1.3. Alcance del trabajo de grado.....	4
1.4. Objetivo general .....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1. Generación de RCD .....	6
2.1.1. Impactos negativos.....	9
2.2. RCD en Colombia.....	11
2.2.1. Clasificación del RCD.....	11
2.2.2. Cuantificación RCD.....	12
2.2.2.1. Índice de generación volumétrico ( $IGR^V$ ).....	13
2.2.2.2. Índice de generación gravimétrico ( $IGR^W$ ).....	13
2.2.3. Normativa Colombiana. ....	15
2.3. Usos potenciales RCD .....	16
2.4. Usos de agregados reciclados cerámicos en concretos. ....	18
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
3.1. Análisis del proyecto.....	22
3.1.1. Presentación del proyecto.....	22
3.1.2. Etapas de obra. ....	23
3.1.3. Sistema estructural .....	24
3.2. Evaluación de la generación de los RCD.....	25
3.2.1. Identificación de elementos no estructurales. ....	26

3.3.	Aprovechamiento del RCD.....	28
3.3.1.	Recolección del residuo. ....	28
3.3.2.	Trituración del residuo. ....	29
3.3.3.	Separación del residuo. ....	30
3.3.4.	Caracterización de materiales.....	31
3.3.4.1.	Caracterización de agregados reciclados. ....	31
3.3.4.2.	Caracterización agregado fino, grueso y cemento. ....	32
3.3.4.3.	Densidad Bulk. ....	33
3.3.4.4.	Granulometría. ....	33
3.3.4.5.	Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos ....	34
3.3.4.6.	Gravedad específica y absorción de los agregados finos.....	34
3.3.4.7.	Resistencia al desgaste de los agregados. ....	35
3.3.4.8.	Densidad del cemento NTC 221-99. ....	36
3.4.	Elaboración de concretos no estructurales con agregados reciclados.....	37
3.4.1.	Concretos fabricados con ARC en obra.....	37
3.4.1.1.	Dosificación de concreto. ....	38
3.4.1.2.	Logística en obra pre fundición. ....	38
3.4.1.3.	Fundición de los concretos con ARC en obra. ....	40
3.4.1.4.	Elaboración y curado de los especímenes. ....	41
3.4.1.5.	Ensayos realizados al concreto en obra. ....	43
3.4.2.	Concretos fabricados con ARC en laboratorio.....	46
3.4.2.1.	Diseño de mezcla para concretos fabricados en laboratorio.....	47
3.4.2.2.	Ensayos realizados a los concretos fabricados en laboratorio. ....	48
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50

4.1. Caracterización de los materiales. ....	50
4.1.1. Granulometría.....	50
4.1.2. Gravedad específica y absorción de los agregados finos (natural y ARC) .....	53
4.1.3. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (natural y ARC).....	53
4.1.4. Densidad Bulk de los agregados reciclados cerámicos .....	54
4.1.5. Resistencia al desgaste del ARC.....	55
4.2. Resultados obtenidos por concretos fabricados en obra.....	55
4.2.1. Asentamiento de los concretos fabricados en obra. ....	56
4.2.2. Resistencia a la compresión concretos fabricados en obra. ....	57
4.2.3. Esclerometría.....	60
4.3. Resultados obtenidos por concretos fabricados en laboratorio. ....	62
4.3.1. Asentamiento de los concretos fabricados en laboratorio. ....	62
4.3.2. Resistencia a la compresión de los concretos fabricados en laboratorio.....	63
4.3.3. Esclerometría de los concretos fabricados en laboratorio. ....	65
5. CONCLUSIONES .....	68
5.1. Recomendaciones.....	69
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
7. GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES.....	75
8. ANEXOS.....	76

## 1. INTRODUCCIÓN

La población mundial está aumentando considerablemente, según la Organización Mundial de Naciones Unidas (ONU,2019) las proyecciones para el año 2030 son de 8.500 millones de habitantes y para el año 2050 es de 9.700 millones de habitantes. Por ende, esto conlleva a un alto número de impactos ambientales negativos: extracción de recursos naturales no renovables, generación de gases de efecto invernadero, producción de residuos y desechos, mayor demanda del agua potable, entre otros. Así mismo, el crecimiento de la población es sinónimo de aumento de construcción, lo cual supone mayores desafíos para la industria.

La industria de la construcción es uno de los principales contaminantes en el planeta, debido a que por ejemplo la producción de cemento requiere alta energía de entrada (830 kcal por kg de Clinker) y una elevada extracción de materia prima en la tierra ,1,7 ton de roca para producir 1 ton de Clinker (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). En adición, la explotación de recursos naturales no renovables para la fabricación de agregados (finos y gruesos). Otra problemática es la elevada generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Los RCD contribuyen con el 35% de desperdicios sólidos en el mundo, la mayoría terminan en rellenos y en sitios no certificados, causando impactos negativos con el medio ambiente (Llatas, 2011).

El uso y aprovechamiento de los RCD se inició con fuerza en los países europeos debido a la insuficiencia de recursos naturales no renovables para la producción de materias primas y materiales de construcción, debido a esto, iniciaron investigaciones científicas de sus propiedades y sus diferentes campos potenciales de uso. Los países de la Unión Europea (UE) fueron los primeros en establecer un marco legislativo para el uso y aprovechamiento de estos residuos. Actualmente, la UE esperó que para el año 2020 tenga un aprovechamiento del 70% de masa del RCD (Llatas, 2011).

La normativa más reciente que reglamenta en Colombia el uso y aprovechamiento de RCD es la Resolución 0472 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La cual estipula que las obras con áreas construidas mayores a 2.000 m<sup>2</sup> deberán aprovechar el RCD en un 2% en el peso total de los materiales utilizados en obra a partir de enero del 2018 y tendrá un incremento anual de dos (2) puntos porcentuales hasta complementar el 30%. Es importante mencionar una particularidad que tiene esta norma, no reglamenta a los pequeños generadores (<2,000 m<sup>2</sup>) donde

la mayoría ejecutan obras como: vivienda, usos comerciales, remodelaciones, etc. Adicionalmente, es pertinente mencionar la normatividad local mediante el decreto 0771 del 20 de diciembre del 2018 de la Alcaldía de Cali.

El presente estudio de caso, se realizando con la colaboración de la constructora Bolívar, el cual se pretende investigar el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, especialmente, el proveniente de las unidades de arcilla cocida para mampostería estructural, con el fin de dar viabilidad para la producción de agregados reciclados que pueden ser incorporados parcialmente en la elaboración de concretos no estructurales en obra.

La ejecución del presente trabajo de grado, toma importancia debido a la gestión integral de los RCD y alternativas de tratamiento para los RCD. Actualmente esta gestión se centra en la disposición final y no en la prevención, reducción, almacenamiento, aprovechamiento, recolección y transporte de los RCD. La disposición final es realizada en escombreras autorizadas por secretaria de planeación. Lo cual, es importante erradicar la informalidad en los botaderos clandestinos y algunos espacios públicos para su disposición. Además, insuficiencia en las alternativas de tratamiento de los RCD.

La incorporación de RCD en concretos no estructurales, el cual, es el enfoque del presente trabajo, permitiría la disminución del impacto ambiental producido por la extracción de recursos natural no renovables, lo que conlleva a la menor generación de gases efecto invernadero. Así mismo, el aprovechamiento de residuos implica menor contaminación del suelo, aire y agua debido a la no disposición en rellenos sanitarios.

La gestión integral de residuos cerámicos de unidades de arcilla cocida, que incluye procesos como la separación y trituración, representa un reto a nivel logístico, debido al conjunto de operaciones para la obtención del producto final. Teniendo en cuenta la misión de la Constructora Bolívar, donde se tiene como fin la sostenibilidad y la protección del medio ambiente, el presente proyecto se enmarca en la búsqueda del mismo.

Considerando las características del proyecto enfocado en el presente trabajo (Paisaje De Las Flores) de la Constructora Bolívar, su ejecución permitiría elevados índices de aprovechamiento de los residuos generados en obra enfocados en su uso para la construcción de elementos de concreto no estructural, considerando que son actividades que se desarrollan en todas las etapas del proyecto.

Finalmente, los grandes y pequeños generadores de RCD deben cumplir con la normativa nacional para alcanzar las metas propuestas anuales de la misma. Además, es necesario crear una cultura de aprovechamiento y gestión de residuos, para contribuir con la sostenibilidad en el sector de la construcción.

A continuación, se presenta la definición del problema de investigación, seguido por la pregunta y finalmente el alcance.

### **1.1. Planteamiento del problema**

La construcción es una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial, lo cual contribuye con 40% de emisiones de gases de efecto invernadero principalmente derivado de la explotación y procesamiento de materia prima (United Nations Environment Programme, 2012). La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) presenta diferentes tipos de problemas, los cuales están enfocados en: contaminación ambiental, problemas sociales, problemas en la capacidad de los sitios de disposición final, entre otros.

Debido al desafío que implica para los grandes generadores cumplir con las metas de la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Decreto 0771 del 2018 a nivel local, toma importancia estudiar el aprovechamiento de los RCD como agregados de construcción en diferentes actividades, se pueden usar como rellenos estructurales, material granular para pavimento, concretos de baja resistencia en elementos no estructurales (andenes, sardineles, contra pisos, tapas de alcantarilla, etc.). El uso de estos residuos, logra disminuir el impacto ambiental de dos maneras. La primera, la reducción de explotación de agregados naturales, lo cual son recursos naturales no renovables y la segunda, la disposición final de estos residuos que afecta directamente los recursos naturales el aire, el agua y suelo.

### **1.2. Pregunta de investigación**

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Es factible el aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción en concretos no estructurales?

### **1.3. Alcance del trabajo de grado**

El presente trabajo, es un estudio de caso, que tiene como objetivo analizar una alternativa de aprovechamiento de RCD en el proyecto Paisaje De Las Flores, ubicado en el municipio de Jamundí, de la constructora Bolívar. Es un proyecto de vivienda de interés prioritario conformado por casas de dos pisos con un área construida aproximada de 41,36 m<sup>2</sup>. Las unidades de vivienda se desglosan en 5 sectores, para un total de 2.236 unidades de casas.

La tipología arquitectónica común del mercado para casas de interés prioritario es dos plantas con dos (2) habitaciones, sala-comedor y cocina en un solo ambiente con patio, un solo baño y espacio para parqueadero. El sistema constructivo del proyecto es en mampostería estructural, siendo las unidades cerámicas de arcilla cocida, el material más utilizado para la construcción del proyecto. Es importante tener en cuenta que el proyecto Paisaje De Las Flores, se encuentra en ejecución específicamente, en el sector 2. Siendo en este lugar dónde se realizó el estudio de caso del trabajo de grado.

Adicionalmente, es importante aclarar que los estudios y resultados que se realizaron durante la ejecución de este trabajo de grado, aplican para las condiciones particulares del proyecto Paisaje de Las Flores. Así como para los materiales, residuos, equipos y demás insumos involucrados.

Finalmente, en la ejecución del presente trabajo de grado, se presentaron percances para el desarrollo de los ensayos de caracterización de los materiales utilizados en el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana a causa de la pandemia mundial COVID-19.

### **1.4. Objetivo general**

Evaluar la alternativa de aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción como agregados para la elaboración de concreto no estructurales.

### **1.5. Objetivos específicos**

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar la actividad del proyecto de vivienda que tenga mayor potencial para el aprovechamiento de los residuos cerámicos.
- Producir y caracterizar el agregado reciclado de residuos cerámicos de construcción.
- Evaluar el efecto de la incorporación de agregados reciclados gruesos en la fabricación de concretos no estructurales en obra y laboratorio.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para el presente trabajo de grado, el marco de referencia está organizado en tres partes; la primera presenta cifras o datos de la generación de RCD desde la escala internacional a lo nacional; la segunda parte presenta una clasificación detallada por categorías de los RCD y la tercera parte, contiene los usos potenciales del RCD en la construcción.

### 2.1. Generación de RCD

Los residuos de construcción y demolición se pueden definir como el material residual generado durante la ejecución de un proyecto de infraestructura, el cual incluye materiales rechazados, materiales descartados, materiales que han tenido cierto tipo de uso y presentan deterioro desde cada una de las etapas de ejecución del proyecto, incluso, materiales relacionados con actividades de movimiento de tierra.

En el año 2016, el 45,7% de los residuos de la UE se depositaron en vertederos y el 37,8% se reciclaron. En adición, se generaron 5,0 toneladas de residuos por habitante (European Commission, 2017). En la Figura 1 se presenta la generación de residuos por actividad económica en la UE. Es importante resaltar, la que presenta mayor generación de desperdicios, es la construcción.

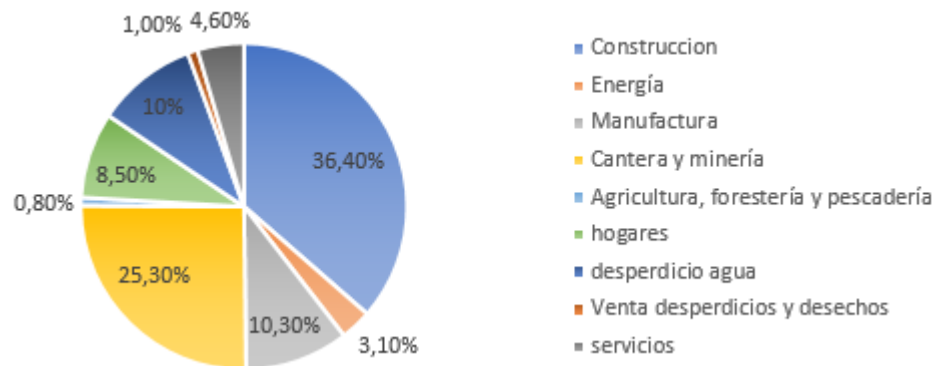


Figura 1. Generación de residuos por actividad económica. Fuente: European commission (2017).

Teniendo en cuenta el contexto de cada país y del marco de legislación, existen metodologías para la gestión de residuos de construcción y demolición RCD. En la Tabla 1 se presenta la generación total de residuos por país y el total de aprovechamiento:

Tabla 1. Total, producción de RCD, panorama mundial.

Países	Total de RCD MT	Total de RCD Aprovechado MT	Total de RCD Aprovechado%
<b>OCEANIA</b>			
Australia	19,3	12,0	62
<b>ASIA</b>			
China	1.020,0	120,0	40
Hong Kong	24,3	6,8	28
Japón	77,0	62,0	81
Taiwán	63,0	58,2	91
Tailandia	10,0	3,2	32
<b>EUROPA</b>			
Bélgica	40,2	34,6	86
Dinamarca	21,7	20,4	94
Finlandia	20,8	5,4	26
Francia	342,6	212,4	62
Alemania	192,3	165,4	86
Irlanda	16,6	13,3	80
Italia	46,3	n.a	n.a
Países Bajos	25,8	25,3	98
Noruega	1,3	0,9	67
Portugal	11,4	5,5	48
España	38,5	5,4	14
Suecia	10,2	n.a	n.a
Suiza	7,0	2,0	28
Reino Unido	114,2	74,2	65
<b>AMERICA</b>			
Estados Unidos	534,0	256,3	48
Canadá	9	3	30
México <sup>a</sup>	10	4	35
Brasil <sup>b</sup>	101,0	6,2	6
Colombia <sup>c</sup>	22		
<b>AFRICA</b>			
Sur África	4,7	0,8	n.a

<sup>a</sup>México, el total de RCD generado. Fuente:(CMIC, 2014)

<sup>b</sup>Brasil, el total de RCD generado. Fuente:(Buss et al., 2012)

<sup>c</sup>Colombia, el total de RCD generado. Fuente: (Instituto de Estudios Ambientales & Colombia, 2017)

**Nota.** Tomado y adaptado de *Generación de residuos panorama mundial*, de Armijos Tinoco, 2019; Buss et al., 2012; CMIC, 2014; Tam et al., 2018; Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, 2017.

En año 2012, el mayor generador de residuos en Asia, fue China (Akhtar & Sarmah, 2017), esto se debe al gran aumento poblacional y la consecuente necesidad de infraestructura. Sin embargo, el mayor residuo que se obtuvo fue en la excavación de suelo y roca. En el segundo lugar de residuos a nivel mundial es India, generando 530 Mton de RCD (Akhtar & Sarmah, 2017), Sin embargo, las reglamentaciones en India, no permiten el agregado reciclado en los concretos. Con

excepción de la India, el porcentaje de aprovechamiento en el continente es alto, debido a que países como Japón, Taiwán y Tailandia presentan limitantes para la explotación de recursos naturales no renovables.

En Norteamérica, el mayor productor de RCD es Estados Unidos con un valor 534 Mton en el año 2012. La agencia de protección ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés (USEPA), preparó un reporte de todos los tipos de generación de desperdicio y en el cual señala que una gran parte de la porción en los desperdicios viene del concreto del Cemento Portland. Sin embargo, el porcentaje de aprovechamiento para el año 2012 fue del 48% (Akhtar & Sarmah, 2017).

En Europa se tienen las cifras más altas de aprovechamiento de RCD debido a varios factores, siendo los recursos naturales no renovables una limitante y la estricta regulación que se tiene en la Unión Europea (Consejo y Parlamento Europeo, 2008). Teniendo en cuenta la Tabla 3, Francia es uno de los mayores productores de RCD con 342,6 MT y a su vez, presenta uno de los porcentajes de aprovechamiento más altos con un valor del 62% (Akhtar & Sarmah, 2017).

En sur América, el mayor productor de RCD es Brasil con una cifra de 101 Mton. A diferencia de otros continentes no presenta problemas para la explotación de recursos naturales no renovables. Sin embargo, se vienen presentando legislaciones y todo tipo de políticas que permitan una óptima gestión, regulación y control de los RCD.

En Colombia, antes de la entrada en vigencia de la Resolución 0472 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la gestión de residuos se reglamentaba por departamento, las reglamentaciones para las principales ciudades del país, eran:

- Bogotá: la Secretaria Distrital de Ambiente 01115 de 2012
- Medellín: Resolución 541 de 2012
- Santiago de Cali: Decreto 0291 de 2005.

Sin embargo, la normativa más reciente que reglamenta en Colombia el uso y aprovechamiento de RCD es la resolución 0472 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La cual estipula que las construcciones mayores a 2.000 m<sup>2</sup> deberán aprovechar el RCD en un 2% del peso total de los materiales utilizados en obra. Se inició a partir de enero del 2018 y tendrá un incremento anual de dos (2) puntos porcentuales hasta complementar el 30%.

### **2.1.1. Impactos negativos**

Los residuos de construcción y demolición presentan un impacto negativo sobre el medio ambiente debido a todas sus implicaciones. Según la UNC (2017) y IDEA, estos son sus impactos ambientales:

Impactos ambientales sobre el medio biótico:

- Impactos en la fauna: la disminución o eliminación del hábitat, el ahuyentamiento por ruido, cambios en la composición de su hábitat y el incremento de especies plaga. Estos impactos se asocian en la intervención de espacios o zonas silvestres con grandes coberturas vegetales.
- Impactos en la flora: disminución de la cobertura y/o sustitución en la cobertura vegetal y eliminación de especies forestales. Es común en la industria de la construcción, la eliminación de especies arbóreas para construcción. Sin embargo, deberá realizar una compensación por dicha eliminación.

Impactos ambientales sobre el medio físico:

- Impactos sobre el agua: infiltración de sustancias peligrosas (mercurio, asbesto, plomo, etc.), disminución del pH, el incremento del potencial de acidificación, el incremento de compuestos nitrogenados y nutrientes en el agua y el incremento de sólidos suspendidos.
- Impactos sobre el aire: incremento del material particulado, incremento de gases clorofluorocarbonados, incremento de dióxido y monóxido de carbono y óxidos de azufre. Estos impactos se destacan en su mayoría en la etapa del transporte, por lo cual es esencial la correcta disposición de estos residuos para la reducción de combustible, lo cual trae los gases anteriores.
- Impacto sobre el paisaje: el incremento de material en las escombreras debido a su disposición final de los residuos y en las montañas debido a su cambio para la explotación del recurso natural.
- Impactos sobre el suelo: cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo debido a la disposición que tienen los residuos y el cambio en el uso del suelo.

Impactos ambientales sobre el medio social:

- Impactos a la infraestructura: agotamiento con la capacidad del relleno sanitario, deterioro de las vías, aumento de la accidentalidad vial y el incremento del transporte no formal (carretillas, carretas, etc.)
- Impactos a la comunidad: tratamiento y aprovechamiento de los RCD, cambio de actividades económicas, incremento del empleo, recuperación y conservación de recursos y materias primas.
- Impactos a la salud: incrementos sobre el desarrollo conductual, dolores de cabeza, enfermedades del sistema nervioso, incremento en enfermedades respiratorias, irritación en los ojos, cáncer, incremento al riesgo de accidentalidad con elementos cortopunzantes, etc.

Por otra parte, teniendo en cuenta el estudio realizado por Universidad Nacional de Colombia (2017) se identificaron los principales problemas relacionados con la gestión de los RCD en Colombia. A continuación, la Tabla 2, se resumen los principales problemas identificados:

*Tabla 2. Problemas principales en la gestión de RCD en Colombia.*

# PROBLEMA	DESCRIPCIÓN PROBLEMA
Problema 1	Inicio de obras de construcción sin tener la respectiva planeación de los RCD.
Problema 2	No se realiza separación de algunos materiales potenciales para su aprovechamiento.
Problema 3	Insuficiencia de alternativas para el tratamiento, gestión, aprovechamiento y disposición final de los RCD.
Problema 4	Poca demanda de materiales provenientes de procesos de tratamiento RCD
Problema 5	Insuficiencia en la logística de los RCD de los generadores
Problema 6	Falta de educación y sensibilización en la gestión adecuada RCD.

Fuente: Universidad Nacional De Colombia.

## 2.2. RCD en Colombia

### 2.2.1. Clasificación del RCD

La clasificación de RCD en Colombia se regula mediante la Resolución 0472 del 2017, la cual define RCD como “residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas” y las clasifica como se puede observar en la Tabla 3.

*Tabla 3. Clasificación RCD en la Resolución 0472 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.*

<b>RCD SUSCEPTIBLES DE APROVECHAMIENTO</b>	<b>RCD NO SUSCEPTIBLES DE APROVECHAMIENTO</b>
a) Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno: coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.	a) Los contaminados con residuos peligrosos.
b) Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás.	b) Los que por su estado no pueden ser aprovechados.
c) Pétreos: hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.	c) los que tengan características de peligrosidad, estos se regirán por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión.
d) No pétreos: vidrio, metales como acero, hierro, cobre, aluminio con o sin recubrimientos de zinc o estaño, plásticos tales como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas y cauchos, compuestos de madera o cartón-yeso (Drywall), entre otros.	

Fuente: Resolución 0472 del 2017 de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Por otra parte, la Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía de Bogotá (2014) define los RCD, como aquellos residuos que resultan de las actividades de construcción (demolición, excavación, construcción y/o reparaciones civiles) o de otras actividades conexas complementarias. En la Tabla 4, se presenta una clasificación de residuos en los cuales se divide en categoría, grupo, clase y la descripción de los componentes:

Tabla 4. Clasificación de RCD en sus diferentes categorías.

CATEGORÍA	GRUPO	CLASE	COMPONENTES
A. RCD APROVECHABLES	I-Residuos mezclados	1. Residuos pétreos	Concretos, ceramicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca y materiales inertes que no sobre pasen el tamiz # 200
	II. Residuos de material fino	1. Residuos finos no expansivos	Arcillas, limos y residuos inertes, poco o no plasticos y expansivos que sobre pasen el tamiz # 200.
		2. Residuos finos expansivos	Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plasticos que sobre pasen el tamiz # 200.
	III. Otros Residuos	1. Residuos no pétreos	Plasticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios, cauchos.
		2. Residuos de carácter metalico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc.
		3. residuos organicos de pedones	Residuos de tierra negra.
		4. Residuos organicos de cespedones	Residuos vegetales y otras especies bioticas
B. RCD NO APROVECHABLES	IV. Residuos peligroso:	1. Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos, explosivos, toxicos, patogenos	Desechos de productos quimicos, emulsiones, alquitran, pinturas, disolventes organicos, aceites, resinas, plastificantes, betunes, barnices, plomo, cenizas, tejas de asbesto, desechos explosivos o desechos que presenten características de peligrosidad en el decreto 4741 de 2005 del Ministerio de Ambiente.
	V. Residuos especiales	No definida	Poliestireno, icopor, carton-yeso (drywall), llantas y entre otros.
	VI. Residuos contaminados con otros residuos	1. Residuos contaminados con residuos peligrosos	Materiales pertenecientes a grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos.
No definida		Residuos contaminados con otros residuos, que hayan perdido las características propias para su aprovechamiento.	
VII. Otros residuos	No definido	Residuos que por requisitos tecnicos no es permitido su reuso en obra.	

Fuente: Secretaría distrital de ambiente de la Alcaldía de Bogotá (2014).

Teniendo en cuenta la Tabla 4, se evidencia en categorías los residuos que pueden ser potencialmente aprovechables y los que, por diferentes condiciones o manejos, pierden su uso potencial. Para el presente estudio de caso, se va a enfocar en los residuos aprovechables del grupo I y clase 1, concretamente en los residuos cerámicos y ladrillos.

### 2.2.2. Cuantificación RCD

La cuantificación de RCD en Colombia está determinada por la resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en función de la cantidad producida, para ello se tienen los siguientes criterios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017):

**Pequeño generador:** es generador de RCD que cumple con las siguientes condiciones: 1) no requiere la expedición de licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades; 2) requiere un área de construcción inferior a 2.000 m<sup>2</sup>.

**Gran generador:** es generador de RCD que cumple con las siguientes condiciones:

1) requiere la expedición de licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades; 2) requiere un área de construcción mayor a 2.000 m<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta los criterios para cuantificación de RCD y debido que el presente trabajo se involucra con un proyecto de construcción superior a los 2.000 m<sup>2</sup>, se cuantifica como gran generador.

En adición, para dar cumplimiento a la resolución 0472 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, los generadores deben tener una mayor planificación, mediante indicadores que permitan un cálculo de generación de residuo durante el desarrollo de las obras y así, estipular las medidas necesarias para la gestión de los residuos.

#### **2.2.2.1. Índice de generación volumétrico (IGR<sup>V</sup>).**

Este índice es utilizado principalmente para la obtención de cifras generadoras de residuos que permitan la comparación de obras con características similares, control de los residuos en obra y analizar el comportamiento de los mismos. Este índice, es calculado dividiendo el volumen (m<sup>3</sup>) de cada material residual con respecto al área (m<sup>2</sup>) de la superficie construida.

$$IGR^V(1) = \frac{\text{Vol material residual (m}^3\text{)}}{\text{Área superficie construida (m}^2\text{)}}$$

#### **2.2.2.2. Índice de generación gravimétrico (IGR<sup>W</sup>).**

Para el cálculo del índice de generación gravimétrico, es mediante la relación entre el peso (kg) de RCD total generado en la obra, con respecto a la superficie total construida (m<sup>2</sup>). También, permite una comparación con obras de similares características.

$$IGR^W(2) = \frac{\text{Peso total RCD (kg)}}{\text{Área superficie construida (m}^2\text{)}}$$

En el estudio realizado por Marín Orrego (2019), el cálculo de generación de índices de RCD, se estimó en la construcción de un mega colegio realizada por el grupo empresarial Líbano S.A.S

ubicado en el municipio de Belén de los Andaquíes en el departamento del Caquetá. En primera instancia, se obtuvo información relacionada en el peso específico, peso y volumen para cada tipo residuo empleado en obra, para el cálculo de los índices.

Los índices de generación volumétrica en el estudio realizado por Marín (2019) son:

*Tabla 5. Índice de generación volumétrico*

<b>Tipo de RCD</b>	<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>IGR<sup>V</sup> (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>
Material vegetal	400,34	0,12
Material de excavación	744,44	0,22
Papel	64,77	0,02
Plástico	2,87	0,001
Metal	0,20	0,00006
Madera	88,78	0,03
Bloque de concreto	23,60	0,01
Ladrillo de arcilla	7,05	0,002
Residuos de mortero	13,00	0,004
Residuos de cerámica	1,39	0,0004
Baldosín de granito	5,17	0,002
Residuos mezclados	29,24	0,01
Total	1.380,64	0,41

**Nota.** Tomado y adaptado de: *Índice de generación de RCD m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> construido* (Marín, 2019).

*Tabla 6. Índice generación gravimétrico.*

<b>Tipo de RCD</b>	<b>Peso total (kg)</b>	<b>IGR<sup>W</sup> (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Material vegetal	338.287	101.6
Material de excavación	604.094	181.4
Papel	11.589	3.5
Plástico	352	0.1
Metal	2.676	0.8
Madera	24.866	7.5
Bloque de concreto	8.522	2.6
Ladrillo de arcilla	3.944	1.2
Residuos de mortero	18.028	5.4
Residuos de cerámica	892	0.3
Baldosín de granito	5.377	1.6
Residuos mezclados	37.422	11.2
Total	1.056.049	317

**Nota.** Tomado y adaptado de: *Índice de generación de RCD m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> construido* (Marín, 2019).

### 2.2.3. Normativa Colombiana

En Colombia existen diferentes reglamentaciones que se deben cumplir para todo lo relacionado con la gestión de los residuos de construcción y demolición. A Continuación, en la Tabla 7 se resume la normatividad básica y en orden cronológico para los RCD:

*Tabla 7. Normatividad Básica RCD en Colombia*

<b>NORMA</b>	<b>TEMA A REGULAR</b>
Decreto ley 2811 de 1974 del Ministerio del Medio Ambiente	Principios generales.
Ley 99 de 1993 del Congreso de la República	Principios básicos.
Resolución 541 de 1994 del Ministerio del Medio Ambiente	Principios básicos de gestión de residuos.
Ley 142 de 1994 del Ministerio de Minas y Energías	Servicios públicos domiciliarios.
Decreto 4741 de 2005 de la Secretaría del Hábitat	Prevención y manejo de residuos peligrosos.
Ley 1295 de 2008 del Ministerio de Educación	Comparendo ambiental.
Ley 1333 de 2009 del Congreso de la República	Régimen sancionatorio ambiental.
Resolución 1115 de 2012 de la Secretaría del Hábitat	Lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital.
Resolución 1138 de 2013 de la Secretaría del Hábitat	Guía de manejo ambiental para el sector de la construcción.
Decreto 1076 de 2015 del Sector de Ambiente y Desarrollo	Decreto único reglamentario sector vivienda, ciudad y territorio – residuos especiales.

<b>NORMA</b>	<b>TEMA A REGULAR</b>
Ley 1801 de 2016 del Congreso de la República	Código nacional de policía.
CONPES 3874 de 2016 del Departamento Nacional de Planeación	Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.
Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Reglamente la gestión integral de los residuos generados en actividades de construcción y demolición RCD.
CONPES 3918 de 2018 del Departamento Nacional de Planeación	Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible en Colombia.
CONPES 3919 de 2018 del Departamento Nacional de Planeación	Política Nacional de edificaciones sostenibles.
Decreto 0771 de 2018 del Departamento Nacional de Planeación	Control a la gestión integral de RCD en Santiago de Cali.

Fuente: Tomado y adaptado: (Universidad Nacional de Colombia, 2017) y (Maat , 2019).

### **2.3.Usos potenciales RCD**

Los RCD tienen diferentes usos potenciales dependiendo de su categoría, grupo y clase, tal como se ilustra en la Tabla 4. Estos residuos pueden ser aprovechables como agregados de construcción en la elaboración de concretos no estructurales, material granular en la estructura de pavimento, rellenos estructurales, entre otros.

En la Tabla 8 se presentan las alternativas de aprovechamiento de acuerdo con la composición del residuo:

Tabla 8. Alternativas de aprovechamiento dependiendo el residuo.

<b>Residuo</b>	<b>Alternativa</b>
	Reutilizar como masa para rellenos
	Reutilizar como suelos en carreteras
Concreto	Reciclar como grava suelta
	Reciclar para producción de morteros y cemento
	Reciclar como granulado
	Reciclar como adoquín
Cerámico	Reciclar como fachada
	Reciclar para acabados
	Reciclar para concretos
Asfaltos	Reutilizar como masa para rellenos
	Reciclar como asfalto
Metales	Reutilizara para la aplicación de otros productos
	Reciclar como aleación
Madera	Reutilizar para casetones, vallados y linderos
	Reciclar para tableros y aglomerados
Vidrio	Reciclar para vidrio
Pétreos	Reutilizar como áridos finos y gruesos
Plásticos	Reciclar como plásticos.

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía de Bogotá (2014).

El presente documento se enfoca principalmente en los residuos cerámicos que produce un proyecto de interés social con casas de dos plantas de una de las constructoras más grandes a nivel local, para el uso potencial de concretos de baja resistencia para elementos no estructurales.

Los residuos de construcción y demolición pueden ser reutilizados en los diferentes tipos de obras civiles. Se usa como material para rellenos y terraplenes en vías, cimentaciones y todo tipo

de movimiento de tierra. Adicionalmente, se utilizan como agregados reciclados para la fabricación de concretos estructurales y no estructurales. Por último, el uso de elementos prefabricadas, tales como: adoquines, bloques, elementos de mampostería, andenes, sardineles, etc.

Los RCD contribuyen con el 35% de desperdicio sólido en el mundo, la mayoría terminan en rellenos y en sitios no certificados, causando numerosos impactos con el medio ambiente (Llatas, 2011). El uso de agregado reciclado en concretos es una de las aplicaciones más utilizadas debido al impacto positivo que genera. La mitigación en la emisión de gases tóxicos y en la explotación de recurso natural no renovable es uno de los factores principales para su aplicación.

#### **2.4. Usos de agregados reciclados cerámicos en concretos**

Los agregados reciclados cerámicos para la construcción de concreto son escasos. Sin embargo, esta tendencia de utilización de RCD cerámico cada vez va en aumento. Según Pérez Rojas (2012) algunos ejemplos de aplicación a nivel mundial, son:

Países Bajos: debido a la falta de disponibilidad de agregados gruesos, se realizó un proyecto piloto en donde se han reemplazado el 20% de agregado grueso en una mezcla de concreto y ladrillo triturado. Este concreto con agregado reciclado se incorporó en un viaducto cerca de la ciudad de Helmond. Además, en las obras de la compuerta del puerto de Schijndel, se utilizó un aproximado de 300 m<sup>3</sup> de concreto con agregado reciclado cerámico.

Adicionalmente, en el mundo se han venido desarrollando diferentes investigaciones sobre la viabilidad del uso de este tipo de residuo en el concreto. a continuación, se describen las más destacadas.

Un estudio realizado por Lum et al (2018), se enfocan en los diferentes usos que se puede tener los residuos cerámicos. Tales como: agregado grueso, fino y parte de reemplazo como material cementante, el polvo de ladrillo. En adición, se afirman que las investigaciones que se han ido realizando se ha visto una mejora en las resistencias de concreto al utilizar el polvo de ladrillo como material cementante. Esto, se dice debido a la composición química, finura del polvo de ladrillo, la potencial actividad puzolánica y el efecto de relleno (*filler*) que representa en una mezcla de concreto.

En general, según Lum et al (2018) se concluye que el reemplazo del cemento en 10-20% con polvo de ladrillo, los resultados de compresión son similares o mayores al de un concreto convencional. Este incremento de la resistencia a compresión podría ser debido al aumento de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el cual, promueve las formaciones de los geles de C-S-H como resultado de una reacción puzolánica.

Por aparte, el estudio señala que el uso de agregado reciclado cerámico causa una ligera reducción en las propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla de concreto. No obstante, se ha encontrado estudios que la incorporación de una cantidad optima de estos residuos cerámicos, se puede afirmar que no afectaría en los requerimientos estándares.

Lum et al. (2018), enfatizan que que alrededor del 20% del reemplazo de agregado natural por agregado reciclado cerámico, no presenta un cambio significativo en las propiedades y resistencias de la mezcla de concreto. Sin embargo, el reemplazo en cantidades superiores al 20% sí afecta la resistencia del concreto y la durabilidad. La resistencia a la penetración de cloruro se ve comprometida debido a la alta porosidad del agregado cerámico lo que ayuda en el aumento de la carbonatación y, también, se llega a doblar la permeabilidad del agua en la incorporación de residuo cerámico.

La investigación realizada por Correia et al. (2005) en la cual se enfoca en encontrar las diferencias en algunos ensayos de durabilidad, tales como: absorción de agua por capilaridad, en inmersión y el ensayo de abrasión. Para concretos, con agregados gruesos cerámicos y un concreto convencional. Se realizan tres muestras de concreto que contienen agregado cerámico grueso y una sola muestra para un concreto convencional de referencia.

Posteriormente, la investigación realiza el ensayo de absorción por inmersión y hace referencia en un aumento significativo en la absorción con la proporción de agregados cerámicos en la mezcla de concreto. Por ende, concluye que la durabilidad de los concretos con la incorporación de agregados cerámicos gruesos, puede llegar ser su principal insuficiencia desde la absorción de agua. Sin embargo, este inconveniente puede ser parcialmente resuelto mediante la pre saturación de los agregados en sitio.

Seguidamente, en el estudio realizan pruebas de abrasión para las diferentes muestras de concreto con diferentes incorporaciones de agregados cerámicos gruesos en las mezclas de concreto. La resistencia a la abrasión depende principalmente de la pasta de cemento. Por lo cual,

sí la conexión de los agregados naturales es más efectiva que con los agregados cerámicos, se tendrá una mejor resistencia a la abrasión.

Por aparte, un estudio realizado por Gomes et al. (2008), en el cual evalúa la incorporación de agregados reciclados cerámicos para la producción de concreto estructural. Se estudia las diferentes propiedades de durabilidad mediante la carbonatación, en diferentes mezclas de concreto con diferentes porcentajes de incorporación de agregados reciclados con respecto un concreto de referencia.

El estudio hace referencia que la incorporación de agregados reciclados cerámicos en los concretos tiene poca diferencia en la carbonatación, con respecto un concreto de referencia. Por ende, se pueden obtener buenas mezclas de concreto con agregados reciclados cerámicos para la resistencia de la carbonatación. No obstante, los concretos con agregados reciclados cerámicos mostraron una intrusión de cloruro algo mayor con respecto el concreto de referencia.

Sin embargo, el estudio realizado por Gomes et al. (2008) mencionan que, desde un punto de vista de durabilidad, es posible fabricar concretos estructurales con agregados reciclados cerámicos, con la incorporación parcial de los agregados y no en su totalidad. Del mismo modo, no es recomendando el uso total de los agregados reciclados, desde el punto de vista mecánico.

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este trabajo se empleó una metodología experimental exploratoria con el fin de evaluar la alternativa de aprovechamiento de Agregados Reciclados Cerámicos (ARC) para la fabricación de concretos no estructurales en obra y laboratorio.

La metodología se llevó a cabo en 4 etapas diferentes. En primer lugar, se tiene análisis del proyecto que incluye la presentación, etapas de obra y sistema estructural. Seguidamente se continuó con la evaluación de la generación de los RCD, así como la fabricación del ARC que contempla el todo el proceso de transformación de residuo cerámico al agregado reciclado cerámico. Finalmente, se realizó la etapa de elaboración de concretos no estructurales con agregados reciclados.

A continuación, en la Figura 2 se detalla la metodología empleada:

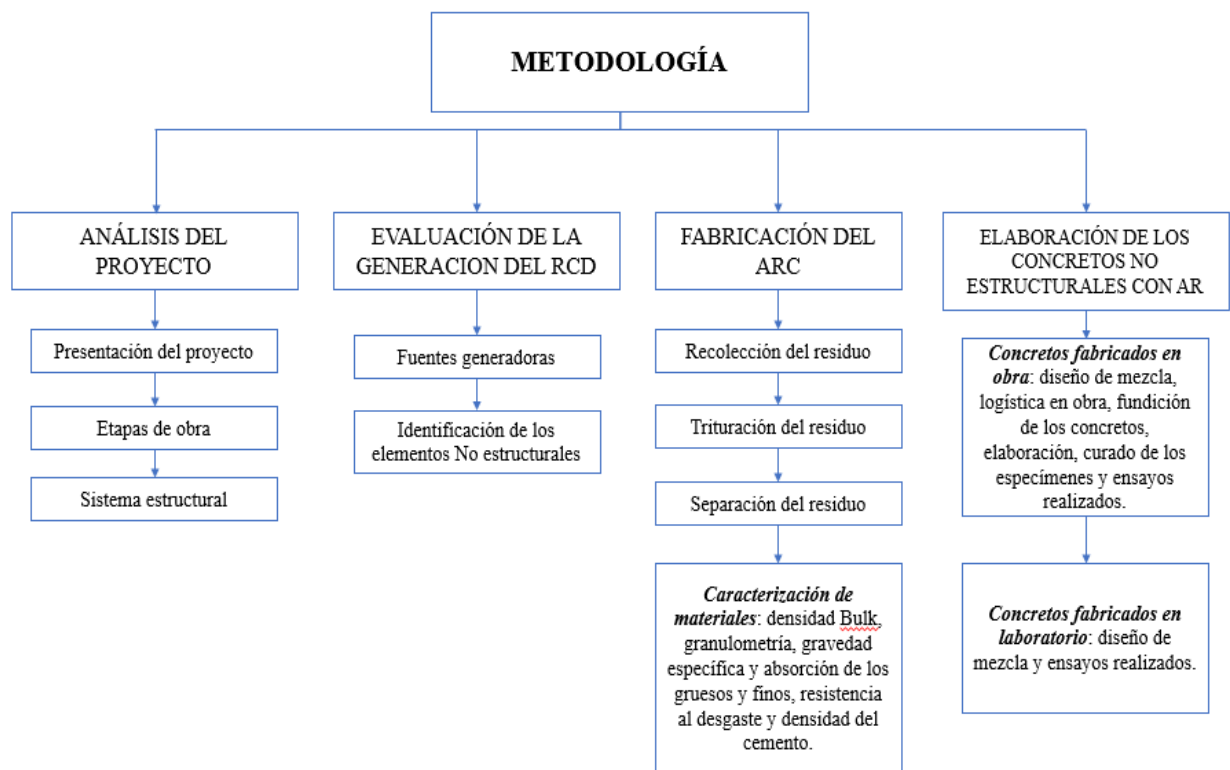


Figura 2. Metodología empleada. Fuente: Propia.

### 3.1. Análisis del Proyecto.

#### 3.1.1. Presentación del Proyecto.

La Constructora Bolívar es una empresa fundada hace más de 20 años, se dedica a la construcción de viviendas para los diferentes estratos socioeconómicos. La presente investigación se desarrolló en el proyecto de vivienda llamado “Paisaje de las Flores” conformado por casas de dos pisos con un área construida aproximada de 41,36 m<sup>2</sup>, y ubicado en el sector Terranova en el Municipio de Jamundí en el departamento del Valle del Cauca (Figura 3). El proyecto, pertenece a la política nacional para garantizar el derecho a una vivienda digna y se cataloga como: “Viviendas de Interés Prioritario” (VIP).

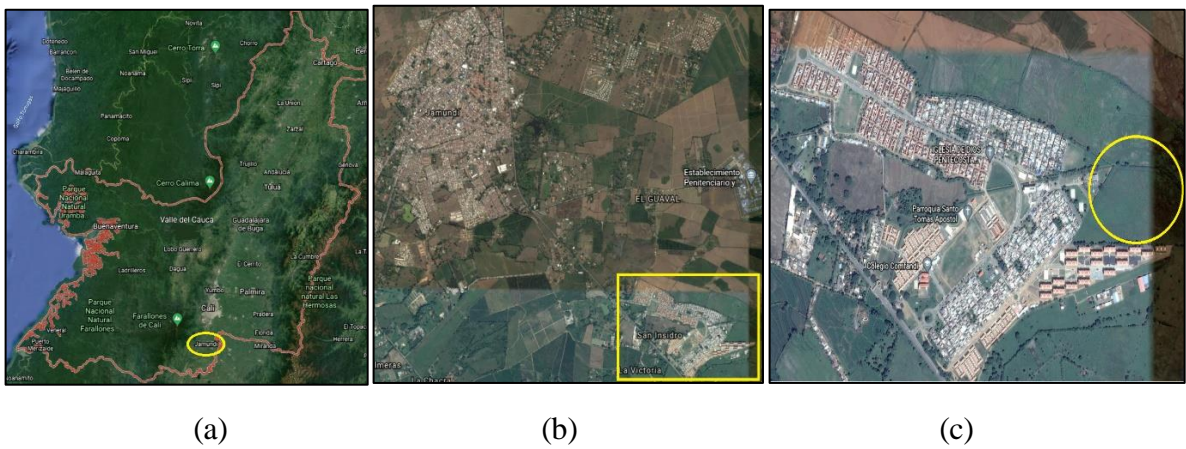


Figura 3. Localización general del proyecto. (a) mapa del Valle del Cauca, (b) municipio de Jamundí y (c) Ubicación proyecto Paisaje de las Flores. Fuente: Google Earth.

La tipología arquitectónica común del mercado para VIP es dos plantas con dos habitaciones, sala-comedor y cocina en un solo ambiente con patio, un solo baño y espacio para parqueadero, como se muestra en la Figura 4.

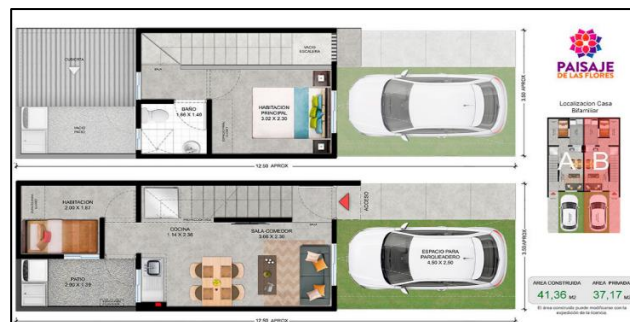
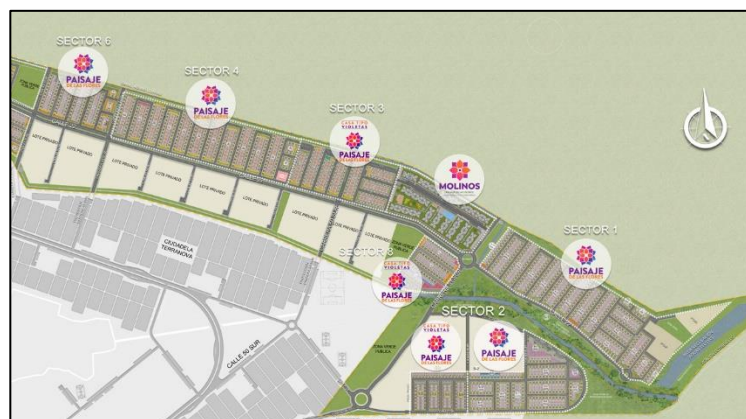


Figura 4. Planta arquitectónica de casa tipo. Fuente: Constructora Bolívar.

### 3.1.2. Etapas de obra.

El proyecto debido a su magnitud fue planeado y proyectado por medio de la realización de 5 sectores, como se presenta en la Figura 5. El primer sector a la fecha de realización de este proyecto ya había sido ejecutado, el sector 2 en el momento de la ejecución de este proyecto estaba en la etapa de realización y los demás sectores se encuentran pendientes por ejecutar. Las unidades de vivienda se desglosan por sector, a continuación:

- Sector 1: 639 unidades de vivienda
- Sector 2: 456 unidades de vivienda
- Sector 3: 321 unidades de vivienda
- Sector 4: 540 unidades de vivienda
- Sector 5: 280 unidades de vivienda



*Figura 5. Planta urbana. Fuente: Constructora Bolívar.*

### 3.1.3. Sistema estructural

El sistema empleado para la construcción del proyecto es en mampostería estructural. Para la construcción de las viviendas, se inicia con el proceso de acondicionamiento del terreno, seguidamente se realizan las instalaciones eléctricas e hidrosanitarias, posteriormente el proceso de fundición de la losa de cimentación, posteriormente la actividad de trazado y pega de mampostería en bloques de arcilla cerámica parcialmente reforzada con dovelas y mortero, se continúa con la fundición de losa de entre piso y finalmente la cubierta.



(a)

(b)



(c)

(d)

*Figura 6. Sistema estructural Paisaje de las Flores. (a) Instalaciones hidrosanitarias, (b) Losa de cimentación, (c) Instalación de mampostería estructural y (d) vivienda terminada. Fuente: Propia.*

El proyecto de vivienda Paisaje de las Flores es seleccionado por diversos factores. En primera instancia, la magnitud del proyecto en unidades de vivienda fabricadas en unidades de arcilla cocida, la necesidad del cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en obra, la necesidad de respuesta debido a los altos índices de generación de residuos y finalmente, la facilidad de acceso al proyecto debido a su ubicación en el municipio de Jamundí.

### 3.2. Evaluación de la generación de los RCD

En el presente trabajo de investigación se identificaron principalmente cuatro fuentes generadoras de residuos en obra.

- 1) Descapote: Proceso en el cual se realiza el retiro de la capa vegetal para el acondicionamiento del terreno.
- 2) Excavación: Se identificaron diversas actividades generadoras de residuo a raíz del proceso de excavación. Tales, como: pavimentación de las vías, construcción de sardineles, andenes y unidades de vivienda.
- 3) Generación de residuos a raíz del corte de las unidades de arcilla cocida.

La actividad que genera mayor cantidad de residuos es aquella proveniente del desperdicio por el corte de las unidades de arcilla cocida mediante cortadora en banco. Como se muestra en la Figura 7. Este corte, se realiza para permitir la pega de mampostería en los diferentes medidas, esquinas o necesidades que se requieren para la construcción de los muros. Adicionalmente, los cortes son necesarios para la instalación de accesorios eléctricos e hidrosanitarios.



*Figura 7. Residuos en cortadora de banco en Paisaje de las Flores. Fuente: Propia.*

- 4) Residuos generados de mampostería y concreto en el sitio de la ejecución de la actividad.

La generación de residuos en sitio se atribuye principalmente a los cortes que se realizan para la pega de la mampostería en el lugar, mala manipulación de los bloques de arcilla, transporte interno de los bloques se realiza en carretilla, con geometría cóncava, lo cual, presenta problemas en la acomodación apropiada del ladrillo y ocasiona roturas del mismo. Finalmente, la ausencia de la modulación para la construcción de las viviendas para evitar cortes. Ver Figura 8.



*Figura 8. Generación residuos en sitio Fuente: Propia.*

Dicho lo anterior, según los datos suministrados por la constructora, se desperdician una cantidad aproximada de 33 ladrillos tipo 1 por cada unidad de vivienda. El ladrillo tipo 1 tiene dimensiones de 29 cm x 12 cm x 21 cm con un peso de 6,5 kg/und., para un peso de 214,5 kg de residuo cerámico por vivienda.

Teniendo en cuenta una generación de RCD cerámicos de 0,24 m<sup>3</sup>/casa en el sector 2, equivalente a una generación de 0,006 m<sup>3</sup> de RCD por m<sup>2</sup> de construcción. Lo cual, evidenció que la cortadora es una de las principales fuentes generadoras del residuo cerámico y dada sus condiciones de residuo “limpio”, se seleccionó para la ejecución del presente proyecto.

### **3.2.1. Identificación de elementos no estructurales**

Previamente a la identificación de los elementos no estructurales, las cantidades de obra suministradas por la Constructora Bolívar en el sector dos, son: mortero 680 m<sup>3</sup>, andenes peatonales 400 m<sup>3</sup>, sardineles 200,73 m<sup>3</sup>, cajas 141,3 m<sup>3</sup>, mampostería 458.000 unidades y 2.564 m<sup>3</sup> de roca muerta. El peso de la mampostería utilizada en el sector dos, es: 2.977 ton.

Debido al tipo de residuo seleccionado y según la revisión bibliográfica elaborada, se concluye que la principal forma de aprovechamiento sería como agregado reciclado cerámico grueso. Por lo tanto, se tomó la decisión de identificar las actividades que involucren el uso de concreto no estructural.

Se realizaron visitas en obra para la identificación, evaluación y cuantificación de los diferentes elementos no estructurales para su potencial aprovechamiento en la incorporación de los ARC. En consecuencia, se identificaron las actividades: sardineles, andenes, adoquines, cajas de servicios públicos, tapas, etc. cómo se puede observar en la Figura 9.



*Figura 9. Identificación de elementos no estructurales. Fuente: Propia.*

Posterior a la identificación de los diferentes elementos no estructurales para el potencial aprovechamiento, se realiza la evaluación de la logística para la ejecución del proyecto en cada uno de estos elementos. Cabe aclarar que este estudio se realizó en el periodo comprendido entre los meses de febrero y octubre; lo que coincidió con las restricciones debido al COVID 19, haciendo mucho más difícil la ejecución del mismo. Consiste en analizar el nivel de dificultad que requiere la fabricación de cada actividad con la incorporación del ARC y aplicación de los ensayos no destructivos (ultrasonido, ferro escáner, esclerometría, etc.). Finalmente, se realiza la cuantificación en volumen de concreto de los elementos no estructurales.

Los andenes presentan mayor facilidad para la fabricación de concreto con incorporación de ARC con respecto los sardineles y cajas, debido a sus dimensiones geométricas. Esto, permite una fácil instalación de formaleta y un mejor vaciado del concreto.

Para la aplicación de los ensayos no destructivos presentan una mayor facilidad en los andenes y sardineles con respecto las cajas de servicios públicos o domiciliarias. La superficie es plana y continua durante el desarrollo de estos elementos a diferencia de las cajas que presentan una mayor complejidad para la elaboración de dichos ensayos.

Finalmente, el tercer criterio para la selección de la actividad, son las cantidades de obra. Con base los datos suministrados por la Constructora Bolívar, en el sector 2 las cantidades por ejecutar son: 200,73 m<sup>3</sup> de concreto para sardinel, 141,3 m<sup>3</sup> de concreto para cajas eléctricas y 400 m<sup>3</sup> de concreto para fabricación de andenes peatonales. Siendo así, los andenes peatonales la actividad con más demanda de concreto.

Como resultado de la identificación, evaluación y cuantificación, el elemento no estructural que permite un mejor desarrollo en la presente investigación y en la cual se va a desarrollar la fundición en obra, son: *los andenes peatonales*. debido sus características geométricas, proceso logístico de fundición y magnitud en el proyecto.

### **3.3.Aprovechamiento del RCD**

Según la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible los RCD son: “los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas...”. La clasificación del objeto de estudio según la resolución 0472 es: RCD susceptible al aprovechamiento y pertenece a la categoría 1.3: pétreos: hormigón, arenas, gravas, trozos de ladrillo y bloques, cerámicas, etc.

Por aparte, la norma Europea CE 98/2008 hace referencia a los RCD, como: “residuos generados por las actividades de construcción y demolición”. A su vez, la norma UNE -EN 933-11, clasifica las unidades de arcilla cerámica en el grupo Rb y los describe como: “unidades de albañilería de arcilla”.

En el desarrollo del presente sub capítulo, se ejecutaron cada una de las actividades descritas a continuación:

#### **3.3.1. Recolección del Residuo**

La selección y recolección del residuo es uno de los aspectos importantes para el desarrollo del presente trabajo de grado. Considerando que, se deben evitar variaciones en el tipo de material y continuidad del mismo, se recolectó el residuo cerámico proveniente de la cortadora, del proyecto Paisaje de las Flores. Posteriormente, el residuo fue empacado en sacos de aproximadamente de 28 kg y se transportó al laboratorio de mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali, como se muestra en la Figura 10.



(a)

(b)

*Figura 10. Residuo cerámico característico proveniente obra Paisaje de las Flores. (a)Residuo en sacos proveniente de obra, (b) residuo característico. Fuente: Propia.*

### **3.3.2. Trituración del Residuo**

El procedimiento de la trituración es fundamental para la obtención del Agregado Reciclado. El proceso inicia depositando el residuo cerámico en la bandeja de la trituradora de mandíbulas, como se muestra en la Figura 11. Según Blanco (2014), el material cerámico se precipita hacia las mandíbulas lo cual utilizan la fuerza predominante de compresión y la aplican al material de forma discontinua por atrapamiento de dos mandíbulas. Una fija y la otra móvil mediante diferentes sistemas de actuación.

Posteriormente, la fuerza de compresión se transmite a la mandíbula móvil que acciona dos placas entre mandíbula móvil y fija. Este movimiento, es un eficiente multiplicador de fuerzas que permite fragmentar el residuo cerámico en agregado reciclado.



*Figura 11. Proceso de trituración mediante trituradora de mandíbulas laboratorio PUJ Fuente: Propia.*

Es importante mencionar, que el proceso de trituración del residuo cerámico se llevó a cabo con personal de la Constructora Bolívar con el fin, de calcular el rendimiento en las condiciones establecidas del laboratorio y mano de obra. La cantidad de bultos de material cerámico proveniente de obra fueron 75 unidades, en los cuales la gran mayoría se encontraban en estado seco y el restante en estado saturado.

El rendimiento promedio que se tuvo para la trituración de 69 bultos con RCD cerámico en estado seco fue de 7,8 kg/min. Por aparte, los RCD en estado saturado tuvieron una disminución significativa, con un rendimiento de 2,9 kg/min calculados en 6 bultos. Dicho lo anterior, se tiene una diferencia de 4,9 kg/min debido la condición del material, como se puede observar en el Anexo 29. Lo que demuestra que las condiciones de humedad del residuo pueden afectar en gran medida las operaciones de trituración y fabricación de los agregados reciclados.

### **3.3.3. Separación del Residuo**

Esta etapa del proceso se realizó mediante una tamizadora mecánica en las instalaciones de la Universidad. El material triturado se tamiza con la malla # 4 (4,75 mm) , siendo esta, la que divide el material fino del grueso, el paso a paso se puede observar en la Figura 12.



*Figura 12. separación del agregado reciclado mediante tamizadora mecánica. (a) Tamizadora mecánica, (b) se ingresó el material no tamizado, (c) proceso de separación mediante malla # 4 y (d) material fino tamizado. Fuente: Propia.*

Finalmente, el agregado reciclado cerámico grueso es el objeto de estudio en este trabajo de grado. Por consiguiente, es empacado y enviado para las fundiciones de los concretos en la obra Paisaje de las Flores.

### **3.3.4. Caracterización de Materiales.**

En el presente proyecto, se realizó la caracterización de los diferentes agregados y materiales empleados. En el apartado siguiente se describe detalladamente cada uno de los ensayos efectuados.

#### **3.3.4.1. Caracterización de Agregados Reciclados.**

La caracterización del Agregado reciclado cerámico, se realizó mediante la toma de muestras obtenidas del proceso de trituración y separación. Posteriormente se procesaron en el laboratorio para determinar las propiedades físicas del material en cuestión. Los ensayos de caracterización del agregado reciclado cerámico, se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Ensayos realizados al Agregado reciclado.

<b>Ensayos</b>	<b>Norma Técnica Colombiana (NTC)</b>	<b>Instituto Nacional de Vías I.N.V.E.</b>
Granulometría	NTC 77-1994	INVE 213-12
Gravedad específica y absorción, agregado fino	NTC 417-05	INVE 223-12
Gravedad específica y absorción, agregado Grueso	NTC 417-05	INVE 222-12
Resistencia al desgaste de los agregados	NTC 98-06	INVE 218-12
Masas unitarias- densidad Bulk	NTC 237-1995	INVE 217-12

Fuente: Propia.

### 3.3.4.2. Caracterización agregado fino, grueso y cemento

Adicionalmente, se realizaron las caracterizaciones de los agregados naturales finos, gruesos y el cemento. A continuación, la Tabla 10 contempla las metodologías empleadas.

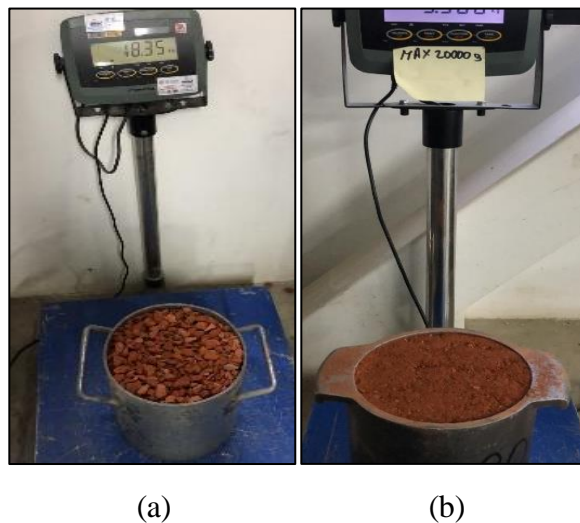
Tabla 10. Ensayos empleados en agregados finos, gruesos y cemento.

<b>Ensayos</b>	<b>Norma Técnica Colombiana (NTC)</b>	<b>Instituto Nacional de Vías I.N.V.E.</b>
Granulometría grueso y fino	NTC 77-1994	INVE 213-12
Gravedad específica y absorción, agregado fino	NTC 417-05	INVE 223-12
Gravedad específica y absorción, agregado Grueso	NTC 417-05	INVE 222-12
Peso específico del cemento	NTC 221-99	INVE 307-12

Fuente: Propia.

### 3.3.4.3. Densidad bulk

Este ensayo permite establecer el peso unitario del material por unidad de volumen. Se realiza mediante dos formas distintas. La primera, en estado suelto, cuando la ubicación de las partículas no está restringida en un espacio determinado, lo cual no permite que las partículas del material a estudiar, se acomoden entre sí, y la segunda; es en estado compacto, cuando si existe acomodación de las partículas por la iteración mecánica de un dispositivo. Simultáneamente se introduce la muestra del material en tres capas diferentes y compactadas cada una con 25 golpes distribuidos en la superficie del recipiente, tal como se puede observar en la Figura 13.



*Figura 13. Ensayos de densidad Bulk en estado suelto y compacto. (a) Agregados Gruesos del RCD y (b) Agregados finos del RCD. Fuente: Propia.*

### 3.3.4.4. Granulometría

El procedimiento inicial que se lleva a cabo para realizar el ensayo, es secar la muestra del material al horno. Posteriormente, el material se lava por el tamiz No. 200 y se lleva a secado al horno. Por último, se introduce en los tamices 1", ¾", ½", 3/8", No 4 y fondo respectivamente para material grueso, en el caso del material fino, se introduce en los tamices 3/8", No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100, No 200 y fondo respectivamente, tal como menciona la norma INVE 213. Seguidamente se empieza a separar el material con la ayuda de un agitador mecánico y luego, se pesa el material retenido de cada uno de los tamices, incluido el fondo.

En la Figura 14 se muestra la distribución granulométrica del agregado reciclado cerámico grueso y los tamices utilizados para la granulometría del fino.

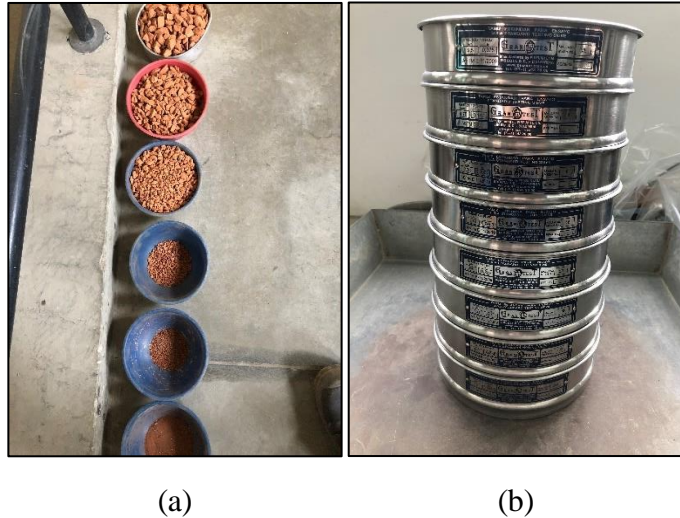


Figura 14. Granulometría. (a) Separación material y (b) tamizado. Fuente: Propia.

#### **3.3.4.5. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos**

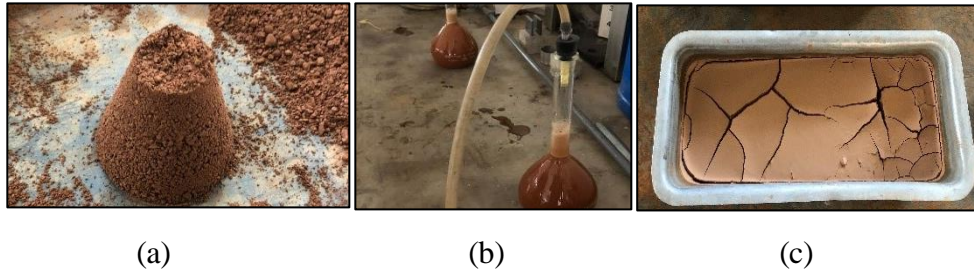
Consiste en tomar una muestra representativa del material, se procede con un lavado al material con el tamiz N°. 4 para eliminar todo tipo de impurezas o material fino adherido en la superficie del agregado, posteriormente se deja en inmersión una muestra representativa del agregado grueso a estudiar en un periodo de 24 horas, con el fin, de estar en condiciones saturadas.

Posteriormente se procede a cuartear el material, como menciona la norma (NTC, 2007). Cada una de las partes es secada superficialmente empleado un paño absorbente, eliminando el exceso de agua. Luego, la muestra se pesa para determinar la masa en condiciones Saturadas Superficialmente Seco (SSS). También, se pesa la muestra en condiciones saturadas mediante una canastilla que se encuentra en inmersión. Finalmente, la muestra se deposita y es llevada al horno por un periodo de 24 horas para obtener la masa en condición seca.

#### **3.3.4.6. Gravedad específica y absorción de los agregados finos**

Se toma una muestra representativa, posteriormente se seca al horno a temperatura constante de 110°C, seguidamente, se deja en inmersión la muestra representativa de agregado fino en un periodo de 24 horas. Pasado este tiempo, se seca el agregado fino en condiciones naturales. Posteriormente, se procede con la prueba del cono de arena para determinar la condición de humedad saturada superficialmente seca (SSS) en las partículas del material. La prueba consiste en llenar el cono con el material fino y se compacta levemente con 25 golpes con el pisón, luego, se retira cuidadosamente el cono y cuando los agregados finos se desmoronan gradualmente,

indica, que la muestra ha obtenido la condición SSS. En la Figura 15 (a) se observa la prueba de cono a los diferentes agregados finos.



*Figura 15. Ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados finos. (a) Prueba del cono, (b) extracción de aire de las muestras y (c) Peso seco del material fino reciclado Fuente: Propia.*

Después se pesa una muestra de 500 g del material fino en cada matraz y se llena lentamente hasta un nivel inferior con agua destilada y humedeciendo las paredes del matraz con el fin, de incorporar todo el material fino y evitar la inserción de aire. Luego, se agita manualmente el matraz por un periodo de 10 minutos, teniendo en cuenta que se debe eliminar el aire incorporado. Seguidamente, la muestra se conecta a un equipo mecánico para la extracción del aire atrapado y no debe sobrepasar un (1) milímetro ver Figura 15 (b). Este procedimiento se realizó para las 3 muestras de cada tipo de material fino (natural y ARC).

Consecutivamente, se toma la masa y temperatura de la muestra con el matraz enrasado con agua, hasta la altura de la marca de calibración. Finalmente, se retira el material fino de cada matraz y se lleva al horno. Con el material seco, se toma la masa de cada muestra. Ver Figura 15 (c).

#### **3.3.4.7. Resistencia al desgaste de los agregados**

La muestra del ensayo se lava y llevado al horno con una temperatura aproximada de 110°C por un periodo aproximado de 24 horas. La muestra se separa teniendo en cuenta la granulometría, se distribuye por las fracciones  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{8}$ " debido que es el material que mayor porcentaje retenido tiene y, por ende, el tipo de gradación (Tipo B).

Posteriormente, se coloca la muestra del ensayo con 11 esferas de acero con una masa entre 390 y 445 gramos en la Máquina de los Ángeles, como se puede observar en la Figura 16. Seguido a esto se gira el tambor a una velocidad entre 30 rpm y 33 rpm hasta completar los 500 ciclos.



*Figura 16. ensayo de resistencia al desgaste mediante la Máquina de los Ángeles. Fuente: Propia.*

Cumplido el número de ciclos, se retira el material de la Máquina de los Ángeles y se realiza una separación del material entre el fino y grueso por el Tamiz N° 12. Seguidamente se lava el material retenido por el Tamiz No 12, se seca el horno en un periodo aproximado de 24 horas y se pesa el material seco.

Según NTC 98-06 se expresa la pérdida la cual es la diferencia entre la masa inicial y la masa final ensayada como un porcentaje de la masa inicial. Este valor, se reporta como pérdida porcentual.

#### **3.3.4.8. Densidad del cemento**

El ensayo se realiza de acuerdo a los lineamientos de la NTC 221-99 y consiste en introducir gasolina en el frasco de Le Chatelier hasta llenar en la medida inicial de 1 ml y se toma la masa inicial. Seguidamente, se introduce en el frasco una cantidad de 64 g de cemento, en pequeñas cantidades, procurando evitar salpicaduras y evitando que el cemento se adhiera a las paredes del frasco. Posteriormente se introduce el tapón y se gira manualmente hasta que no asciendan burbujas en la superficie, con el fin de eliminar el aire.

Finalmente se llena con gasolina hasta la parte superior de graduaciones del frasco y se toma la masa final. La lectura se realizó una vez estabilizada la temperatura mediante el baño de agua. Como se puede observar en la Figura 17. Este procedimiento se realiza con tres muestras diferentes y se obtuvo un resultado del peso específico obtenido del cemento hidráulico de uso general es de  $2,997 \text{ g/cm}^3$ .

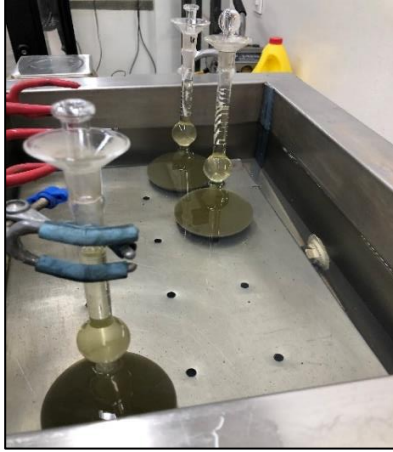


Figura 17. Frascos sumergidos en baño de agua para estabilización de temperatura. Fuente: Propia.

### **3.4.Elaboración de concretos no estructurales con Agregados Reciclados**

En el desarrollo del presente trabajo se realizaron inicialmente cuatro tipos de concretos en obra y posteriormente, se replicaron dos tipos de concretos en laboratorio para verificar los comportamientos mecánicos, bajo curado en inmersión.

#### **3.4.1. Concretos fabricados con ARC en obra**

En el presente ítem se describe cómo se realizó el aprovechamiento del agregado grueso reciclado como sustitución parcial en concretos fabricados en obra. La aplicación de este proyecto en colaboración con la constructora Bolívar, se pretendió realizar fundiciones en andenes peatonales con dimensiones aproximadas: Largo=55 m; ancho= 1 m; Espesor 10 cm, para un total aproximado de 5,5 m<sup>3</sup> de concreto.

Por otro lado, es importante mencionar, que los concretos fabricados en obra con incorporación de ARC, son un reto de planeación y logística. Puesto que, las condiciones presentadas no son controladas. Lo cual, está sujeto a imprevistos o alteraciones que afecten los resultados. Sumado a esto, el tratamiento de separación y trituración que se le realizó a los RCD fuera de obra.

Finalmente, la coordinación y logística requerida en los diferentes aspectos para la fundición del concreto en mención. A continuación, se describe detalladamente las actividades realizadas:

### 3.4.1.1. Dosificación de Concreto

El diseño de mezcla fue suministrado por la Constructora Bolívar para la fabricación de concreto con incorporación de agregado reciclado cerámico en andenes peatonales. Para ello, es fundamental tener como base un diseño de concreto convencional. A continuación, se presenta el diseño utilizado para la dosificación en volumen del concreto convencional. Ver Tabla 11.

*Tabla 11. Dosificación suministrada por la Constructora Bolívar. Fuente: Propia.*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Cemento de uso General	Saco (50 kg)	1,0
Arena mediana	Cajón (36 L)	2,0
Grava triturada ¾"	Cajón (36 L)	3,0
SikaPlast 6000	L	0,1
Agua	L	40

### 3.4.1.2. Logística en obra pre fundición

La fabricación de los concretos con incorporación de agregado reciclado en obra, requiere una serie de logística y coordinación con los diferentes profesionales del proyecto “Paisaje de las Flores” de la Constructora Bolívar.

Dicho lo anterior, la fundición se programó en el sector dos en un tramo continuo de 55 metros lineales de andén. La distribución se realizó en cuatro tramos de 15 m lineales, uno para el concreto de referencia y tres para los concretos con reemplazos en volumen del agregado grueso natural por el agregado reciclado (10, 20 y 33%). Con el fin, de tener una clara visualización en los diferentes comportamientos mecánicos en los concretos.

Es importante aclarar, que para cada tipo de concreto se tomarán 12 especímenes cilíndricos (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) con el fin de realizar las respectivas pruebas (6 a los 7 días

y 6 a los 28 días de edad), para un total de 48 ensayos de resistencia a compresión. Es importante mencionar, que se realizó dos tipos de curado: inmersión y al aire.

Para la dosificación en volumen de los agregados se fabricaron en obra siete (7) cajones en madera con diferentes medidas, con el fin de realizar el reemplazo del agregado grueso por agregado reciclado.

De los siete (7) cajones fabricados, cuatro (4) tenían medidas diferentes a los demás, debido a las cantidades de Agregado Reciclado y, los tres (3) cajones restantes, tenían la misma dimensión de 36 litros (33cm x 33cm x 33 cm). Es importante mencionar, que cada uno de los cajones especiales, estaban enumerados del 1 al 4, con el fin de identificar su uso específico en cada tipo de concreto.

En adición, se coordinó de manera anticipada con los profesionales de la obra, tener todos los insumos, equipos, materiales y mano de obra, para la fecha de fundición. Como se observa en la Tabla 12. Es importante mencionar, que todos los elementos no estructurales y estructurales se realizan con concreto premezclado.

*Tabla 12. materiales y equipos solicitados para fundición. Fuente: Propia.*

Material y/o equipo	Unidad	Cantidad
Cemento	Bultos 50 kg	42
Grava ¾"	m <sup>3</sup>	2
Arena mediana	m <sup>3</sup>	2
ARC	m <sup>3</sup>	1,66
SikaPlast 6000	L	10
Camisas (10cm diámetro x 20 cm alto)	Und.	48
Mezcladora (1 saco)	Und.	1

Finalmente, se coordinó tener formaletas instaladas, nivelación, compactación y demás especificaciones técnicas de la Constructora en el terreno de 55 metros lineales, para la fundición de andenes.

### **3.4.1.3. Fundición de los concretos con ARC en obra**

Previamente a la fundición, se aplicó una saturación al ARC mediante técnica de rocío con manguera, debido a la alta absorción que presenta y con el objetivo de no afectar el agua del diseño de mezcla. Posteriormente, el proceso de fundición siguió las recomendaciones de la dosificación entregada por la Constructora para concreto, como se ilustró en la Tabla 12.

Las fundiciones de los diferentes concretos se realizaron mediante una secuencia que permitiera una estructura lógica. En los primeros metros lineales de anden, se fundió el concreto de referencia, seguidamente se fundieron los concretos de 10, 20 y 33% de incorporación de agregado reciclado respectivamente.

Al inicio, en la fabricación del concreto de referencia, se presentó percance en la trabajabilidad del concreto, poco asentamiento y consistencia seca con el diseño de mezclas, tal como se puede observar en la Figura 18. Por lo que fue necesario la inclusión de los 0,1 litros aditivos SikaPlast 6000 por cada bulto de cemento.



*Figura 18. Consistencia del concreto de referencia bajo diseño inicial. Fuente: Propia.*

Las imágenes presentadas a continuación evidencian el proceso de fundición de los concretos con incorporación de ARC. Ver Figura 19.

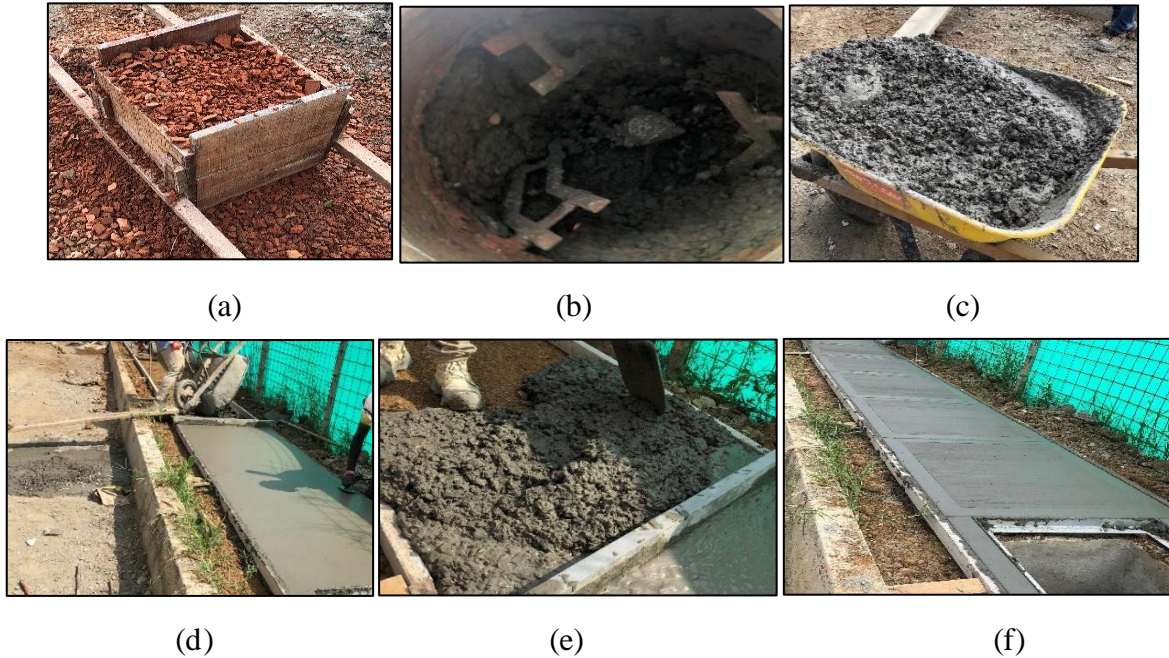


Figura 19. Proceso de fundición ARC. (a) evidencia la dosificación del ARC con un porcentaje de incorporación del 33%, (b) proceso de mezclado, (c) transporte del concreto, (d) y (e) vaciado del concreto y (f) texturizado del concreto. Fuente: Propia.

Es importante destacar, que el concreto con incorporación de ARC no presenta alteraciones en su color y finalmente, se tomaron muestras de los agregados utilizados en la fundición, con el fin, de calcular las humedades en las que se encontraban.

#### 3.4.1.4. Elaboración y curado de los especímenes

Simultáneamente al proceso de fundición, de cada uno de los concretos utilizados en esta investigación, se tomaban muestras de concreto siguiendo los lineamientos de la norma NTC 673 para la elaboración de los especímenes de prueba, correspondientes al concreto a analizar. Del mismo modo, se realizaron el llenado de los 36 especímenes restantes correspondientes a los tres concretos con diferentes incorporaciones de agregado reciclado.

En adición, las formaletas se agrupaban en grupos de 12, evitando así una posible confusión de los concretos a analizar y permitiendo una secuencia lógica de llenado para cada uno de los concretos, como se muestra en la Figura 20.



*Figura 20. Especímenes de concreto en estado fresco. Fuente: Propia.*

Al final de la jornada de fundición, las muestras de concreto se cubrieron con un plástico protector para evitar cualquier tipo de alteración en los especímenes. Al día siguiente, cuando el concreto ya estaba en estado endurecido, se procedió con la identificación para cada una de las muestras tomadas.

La Tabla 13 ilustra la nomenclatura, descripción y número de especímenes por edad de ensayo y tipo de curado de los diferentes concretos utilizados en el desarrollo de la presente investigación.

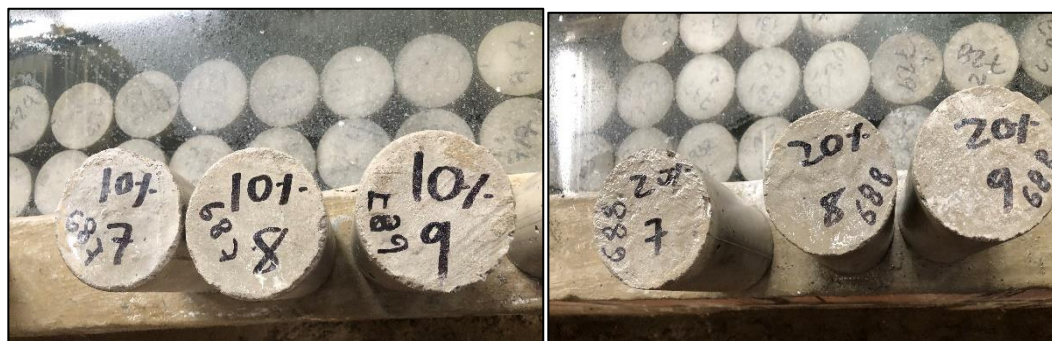
*Tabla 13. Descripción y nomenclatura de especímenes de concreto. Fuente: Propia.*

Nomenclatura	Descripción	Numero de especímenes		Tipo de curado	
		7 días	28 días	Inmersión	Al aire
C.C	Concreto convencional	3	3	3	3
10%	Concreto con incorporación del 10% de ARC en volumen.	3	3	3	3
20%	Concreto con incorporación del 20% de ARC en volumen.	3	3	3	3
33%	Concreto con incorporación del 33% de ARC en volumen.	3	3	3	3

Como se puede observar, el código utilizado para cada uno de los especímenes, estaba compuesto por una nomenclatura que permitiera identificar, el tipo de concreto y el número de su secuencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, los números (1,2,3,4,5,6) de cada tipo de concreto, fueron ensayados a los 7 días de edad. permitiendo así, 3 especímenes en curado óptimo para la obtención de la resistencia potencial, según las recomendaciones de la norma NTC 550, y los otros con curado al aire para simular las condiciones de obra.

En la Figura 21 se evidencia la respectiva marcación de los cilindros en estado endurecido.



*Figura 21. Marcación de especímenes en diferentes condiciones y porcentajes de incorporación de ARC. Fuente: Propia.*

#### **3.4.1.5. Ensayos realizados al concreto en obra**

Los ensayos que se emplearon en la investigación, permitieron conocer las propiedades mecánicas del concreto, trabajabilidad y los índices de dureza superficial del concreto.

##### **Asentamiento**

El primer ensayo realizado, fue el ensayo de asentamiento, el cual nos dice la consistencia del material y su trabajabilidad. Los procedimientos realizados se hicieron bajo las recomendaciones de la norma NTC 396 de asentamiento, como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Ensayo de asentamiento bajo norma NTC 396. Fuente: Propia.

### Resistencia a la compresión.

Posteriormente, se realizaron los ensayos de resistencia a compresión, en las edades de 7 y 28 días para cada uno de los cuatro concretos empleados en obra. El ensayo se realizó en las instalaciones de la obra “Paisaje de las Flores”, siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 673, tal como se muestra en la Figura 23.

Para cada espécimen de concreto antes de ser ensayado, se registraban los datos de masa (Figura 23)

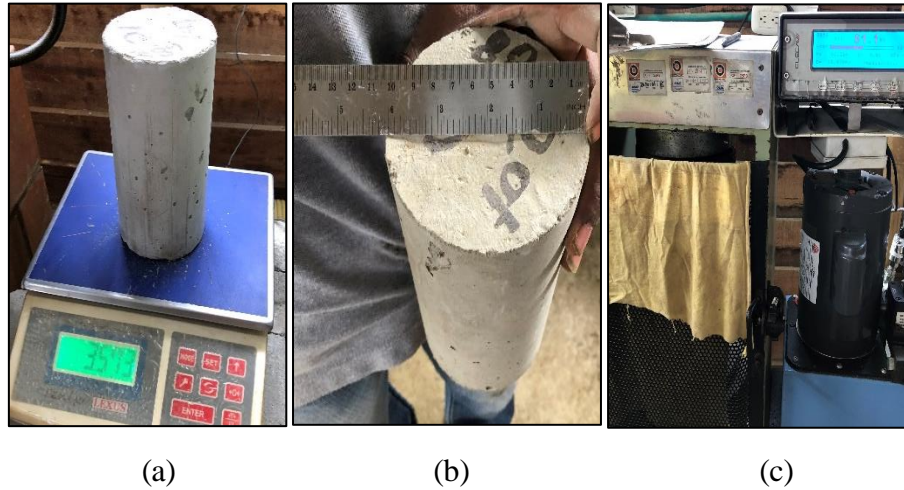




Figura 23. Ensayo de compresión. (a) registro de masa, (b) registro de diámetros, (c) y (d) ensayo en ejecución, (e) espécimen ensayado y (f) recolección de especímenes ensayados. Fuente: Propia

### **Esclerometría**

Finalmente, se empleó el ensayo de esclerometría en las edades de 7 y 28 días. Según la norma I.N.V.E 413-07 Este ensayo tiene varias aplicaciones, algunas de ellas son:

- Evaluar la uniformidad del concreto in situ.
- Delinear zonas de concreto pobre o deteriorado de las estructuras.
- Detectar cambios en el tiempo de las características del concreto, tales como: velocidad de endurecimiento, acción de temperaturas, etc. Lo cual se tiene información útil como tiempo de desencofrado.

El resultado del ensayo no destructivo, empleando esclerometría tiene diferentes variables de incidencia, según Gómez (1987), son: tipo de cemento, contenido de cemento, tipo de agregado grueso, compactación, edad, tipo de superficie, humedad y temperatura.

En la Figura 24 evidencia el proceso de preparación de la superficie y toma datos en el ensayo de esclerometría.

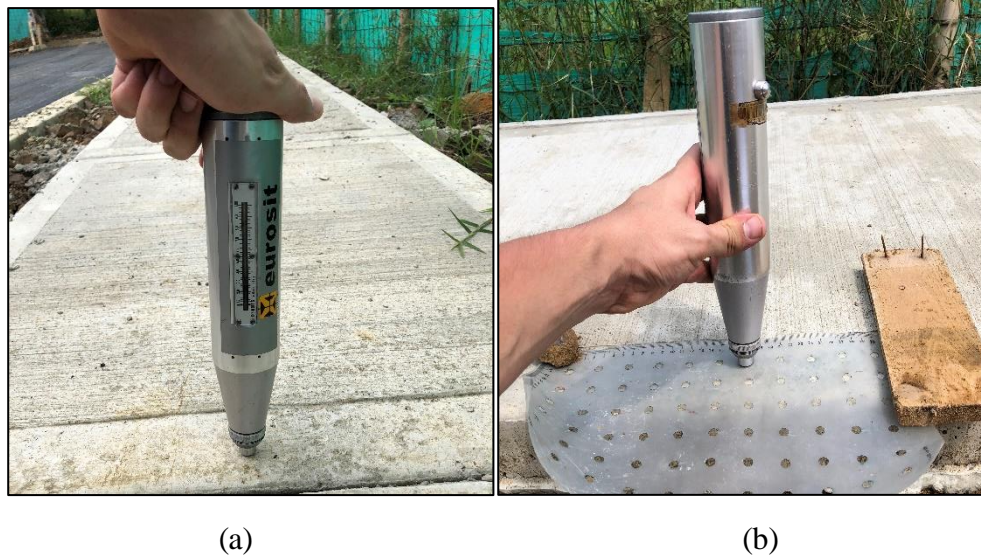


Figura 24. Esclerometría. (a) Toma de ensayo y (b) preparación de la superficie. Fuente: Propia

### 3.4.2. Concretos fabricados con ARC en laboratorio

La presente investigación continuó a raíz de los resultados obtenidos en la fabricación de los concretos con ARC en obra. Por ende, se elaboraron dos tipos de concretos en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Con el fin, de evaluar los comportamientos mecánicos en condiciones controladas y brindar una tendencia clara de los mismos.

Los concretos fabricados fueron: Referencia sin inclusión de ARC y 20% de incorporación de ARC. Conviene subrayar que la fabricación de estos concretos en laboratorio, pretende simular los mismos parámetros de fabricación de los concretos de obra con la misma dosificación en volumen. Con el fin, de evitar alteraciones.

Por consiguiente, el agregado grueso y fino se recopilaron del mismo proveedor utilizado en la fundición de obra. El cemento de uso general utilizado, fue de la misma cementera. Finalmente, se utilizó el ARC proveniente de “Paisaje de las Flores” y se saturó con agua previamente a la fundición, tal como se observa en la Figura 25.



*Figura 25. Materiales utilizados en fundición. (a) saturación previa del ARC, (b) agregado fino, (c) agregado natural grueso y (d) cemento de uso general. Fuente: Propia.*

#### **3.4.2.1. Diseño de mezcla para concretos fabricados en laboratorio.**

Es importante tener en cuenta, que se partió como base el mismo diseño de mezcla utilizado en la fundición de obra, por lo que se simularon las condiciones de dosificación en volumen. Sin embargo, es necesario adaptar la dosificación debido al bajo volumen de fundición en laboratorio.

En la Tabla 14 se muestran las cantidades utilizadas para las fundiciones del concreto de referencia y 20% de reemplazo del agregado grueso natural por ARC.

*Tabla 14. Diseño de mezclas para fabricación concretos de referencia.*

Material	Unidad	Cantidad concreto de referencia	Cantidades 20% ARC
Cemento de uso General	kg	3,86	5,79
Arena mediana	kg	5,56	10,59
Grava triturada ¾"	kg	8,34	10,00
SikaPlast 6000	L	0,0077	0
Agua	L	3,089	2,99
ARC	L	0	2,99

#### **3.4.2.2. Ensayos realizados a los concretos fabricados en laboratorio.**

Posterior a la fundición, se realizaron los ensayos de: asentamiento NTC 396 Figura 26 (a), ensayo de resistencia a compresión NTC 673 Figura 26 (b) y esclerometría I.N.V.E 413-07 Figura 26 (d).

Es importante aclarar, que para cada tipo de concreto se tomaron 6 especímenes cilíndricos (10 cm de diámetro y 20 cm de altura) con el fin de realizar las respectivas pruebas (3 a los 7 días y 3 a los 28 días de edad), para un total de 12 ensayos de resistencia a compresión bajo curado en inmersión. Ver Figura 26 (c).



(a)

(b)

(c)

*Figura 26. (a) ensayo de asentamiento, (b) ensayo de resistencia a compresión, y (c) ensayo de esclerometría. Fuente: Propia.*

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los agregados gruesos, finos, ARC y cemento utilizados en el desarrollo. Adicionalmente, se incluye el análisis de los resultados de los concretos fabricados durante del desarrollo del proyecto, tanto en la fase de obra como de laboratorio. Cabe resaltar que las propiedades determinadas fueron: el asentamiento, la resistencia a compresión y el índice de rebote por medio del esclerómetro.

### 4.1. Caracterización de los materiales.

#### 4.1.1. Granulometría

Los ensayos granulométricos se realizaron para los agregados grueso, finos y ARC utilizados en las diferentes fundiciones. La metodología aplicada siguió las recomendaciones de la norma INVE 213-07. En los Anexos 3 a 5, se encuentran los resultados de la granulometría de las muestras analizadas de los agregados grueso, fino y reciclados cerámicos respectivamente.

Como se puede observar en la Tabla 15 se presentan los diferentes parámetros obtenidos en los diferentes agregados utilizados en el desarrollo de la presente investigación.

*Tabla 15. Módulo de finura, tamaño máximo nominal y tamaño máximo de los agregados. Fuente: Propia.*

Parámetro	Ag. Grueso	Ag. Fino	ARC
MF	6,9	2,0	6,7
TMN	1"	3/8"	3/4"
TM	1 1/2"	1/2"	1"

El módulo de finura es un índice aproximado de tamaño medio de los agregados. Lo cual quiere decir que, según Polanco Rodríguez (2012), mientras el valor de MF sea más pequeño, el tamaño del agregado es más fino. El módulo de finura del agregado grueso natural es 6,9, valor muy parecido al del agregado reciclado lo que muestra una compatibilidad en la distribución del tamaño de las partículas. Así mismo, el agregado fino natural posee un valor bastante bajo lo que lo clasifica como una arena muy fina.

En la Figura 27, se presenta la curva granulométrica del agregado grueso. Como se puede observar los resultados obtenidos están dentro de los límites como lo especifica la Norma NTC 174 (2000), que establece los requisitos de gradación y calidad de los agregados para uso en el concreto.

No obstante, la norma especifica que el proveedor de los agregados deberá suministrar las respectivas pruebas de los concretos, utilizando agregado similar de la misma fuente y estos, han brindado un servicio satisfactorio estando en las mismas condiciones.

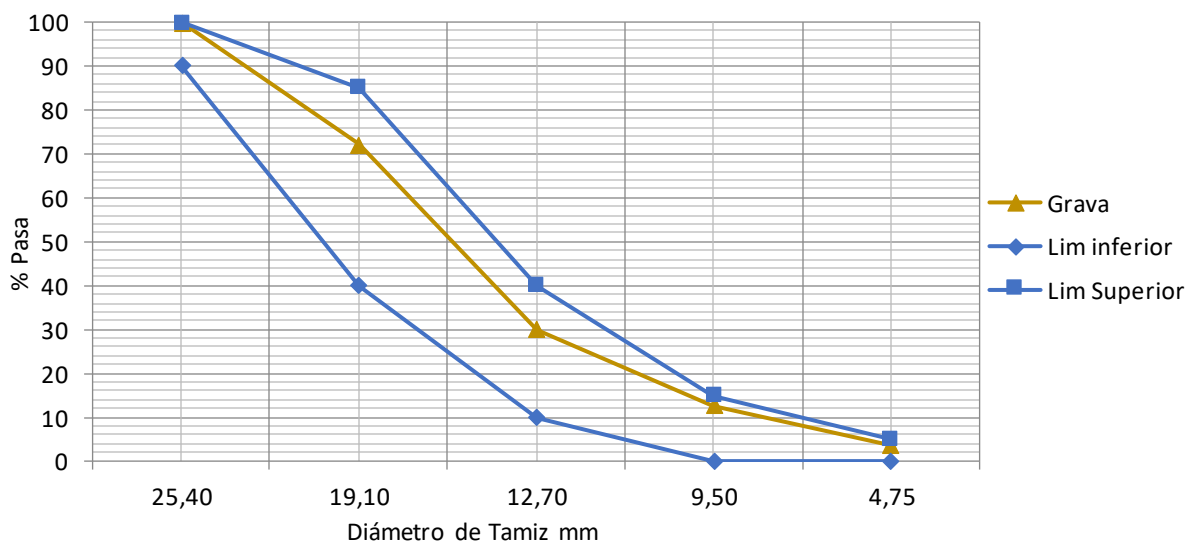


Figura 27. Curva Granulométrica agregado grueso. Fuente: Propia.

En la Figura 28, se presenta la curva granulométrica del agregado Fino. Como se puede observar, los resultados obtenidos en los tamices No. 8 y No. 16 están por dentro de los valores establecidos como lo especifica la Norma NTC 174 (2000), que establece los requisitos de gradación y calidad de los agregados para uso en el concreto. Sin embargo, los tamices No. 30, No. 50 y No. 100 nos indica que la arena es más fina que el límite inferior.

Se recomienda realizar una solicitud al proveedor del material para que se ejecute una revisión del proceso de mezclado de las fracciones, con el fin de que este cumpla con la normativa.

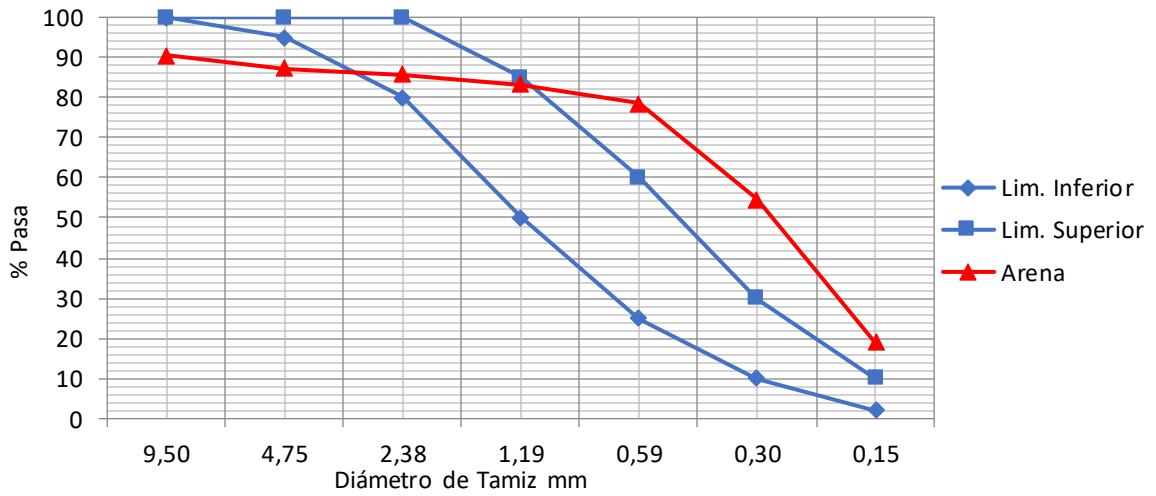


Figura 28. Curva Granulométrica agregado fino. Fuente: Propia.

En la Figura 29, se presenta la curva granulométrica del ARC. Los agregados reciclados cerámicos cumplen dentro de los límites establecidos por la norma NTC 1741 (2000), que establece los requisitos de gradación y calidad de los agregados para uso en el concreto.

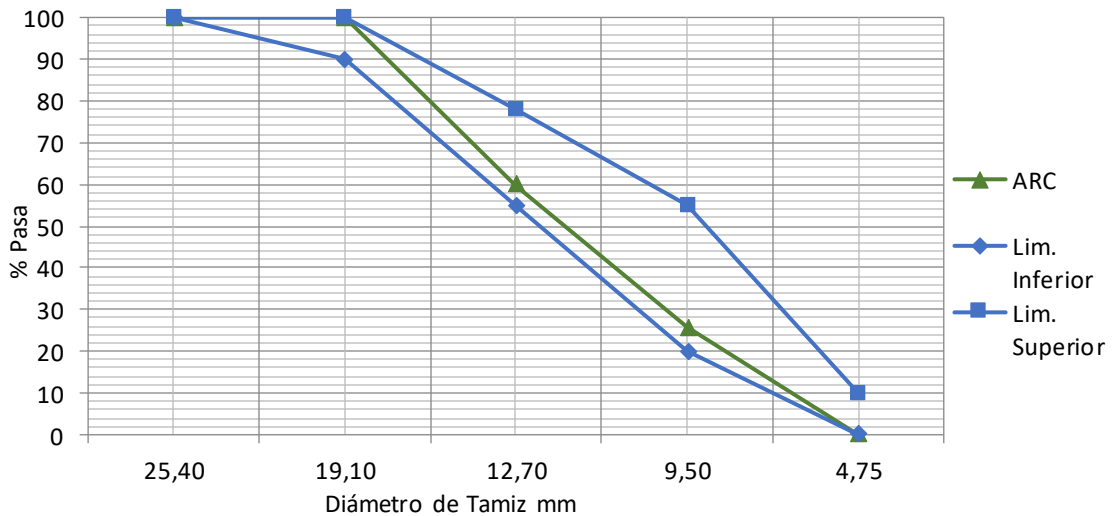


Figura 29. Curva Granulométrica ARC. Fuente: Propia.

#### 4.1.2. Gravedad específica y absorción de los agregados finos (natural y ARC)

El ensayo se realizó de acuerdo a los lineamientos establecidos por la norma NTC 417-05, el cual se realizan 3 ensayos para cada muestra. En la Tabla 16, se muestran los resultados promedio, obtenidos por cada tipo de material.

*Tabla 16. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados finos (natural y ARC). Fuente: Propia.*

<b>Descripción</b>	<b>Fino Natural</b>	<b>ARC Fino</b>
Gravedad específica Bulk	2,91	2,04
Gravedad específica Bulk SSS	2,94	2,3
Gravedad específica aparente	2,99	2,76
Absorción %	0,92	12,74

Según Bravo y Bravo (2019), en el cual caracterizaron una fuente de agregados naturales en el municipio de Cali, lo cual obtuvo los siguientes valores: Gravedad específica Bulk  $2,80 \text{ g/cm}^3$ , Gravedad específica Bulk SSS  $2,72 \text{ g/cm}^3$ , Gravedad específica aparente  $2,68 \text{ g/cm}^3$  y absorción 1,6%. Con lo anterior, se demuestra que los Agregados Naturales tienen una mayor gravedad específica con respecto a los Agregados Reciclados Cerámicos. Sin embargo, se evidencia una diferencia significativa en la absorción de los agregados finos naturales y ARC, lo que puede influir en la dosificación del concreto. cabe aclarar que este proyecto no se trabajará con agregado reciclado fino.

#### 4.1.3. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (natural y ARC)

Teniendo en cuenta que en el presente trabajo tiene como foco el aprovechamiento del agregado grueso reciclado, se analizaron los resultados de gravedad específica y absorción. En la Tabla 17 se muestran los resultados promedio por tipo de material.

*Tabla 17. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (natural y ARC). Fuente: Propia.*

<b>Descripción</b>	<b>Grueso Natural</b>	<b>ARC Grueso</b>
Gravedad específica Bulk	2,67	1,87
Gravedad específica Bulk SSS	2,76	2,19
Gravedad específica aparente	2,96	2,74
Absorción %	1,01	16,82

Según Bravo & Bravo (2019), en el cual caracterizaron una fuente de los agregados gruesos en la Ciudad de Cali, obtuvo valores de gravedad específica Bulk 2,93 g/cm<sup>3</sup>, Gravedad específica Bulk SSS 2,85 g/cm<sup>3</sup>, Gravedad específica aparente 2,81 g/cm<sup>3</sup> y absorción de 1,5%. Dicho lo anterior, se puede afirmar que los agregados naturales utilizados, están dentro del rango.

Sin embargo, la absorción obtenida por los ARC es elevada con respecto los agregados naturales. Es importante mencionar que la absorción es un factor determinante para la preparación de los concretos. En el caso de los ARC, es fundamental una pre saturación con agua debido a su alto porcentaje de absorción y en caso de lo contrario, la relación agua cemento va a estar afectada y por consiguiente las propiedades del concreto.

#### **4.1.4. Densidad Bulk de los Agregados Reciclados Cerámicos**

Los ensayos de densidad Bulk se realizaron a los ARC finos y ARC gruesos en condiciones compactados y sueltos de acuerdo a los lineamientos que exige la norma INVE 217. En la Tabla 18 se muestran los resultados promedio en estado compacto y suelto de los ARC fino.

*Tabla 18. Resultado promedio: Densidad Bulk de los ARC finos.*

<b>Descripción</b>	<b>Compacto</b>	<b>Suelto</b>
Densidad Bulk (kg/L)	1,397	2,78
Densidad Bulk (kg/m <sup>3</sup> )	1.127	1.018

La densidad Bulk es mayor en el ARC fino debido al mejor acomodamiento entre partículas y, por lo tanto, menores espacios vacíos entre las mismas.

#### 4.1.5. Resistencia al desgaste del ARC

La resistencia al desgaste de los Agregados Reciclados Cerámicos se determinó mediante la norma INVE 218-12. Según Bravo & Bravo (2019) la pérdida por desgaste de los agregados naturales en la Ciudad de Cali es del 25%, un valor inferior con respecto el porcentaje de pérdida por abrasión de los ARC analizados en el presente estudio, que es, del 58,3%.

Por consiguiente, es importante mencionar que los ARC no cumplieron con esta especificación, sin embargo, esto no debe ser un criterio para la no utilización de este tipo de agregados. Se recomienda la creación de normas ajustadas al desempeño de los ARC.

Según Armijos Tinoco (2019) los AR tienen particularidades en lo cualitativo, con un desgaste mayor al permitido, lo cual, se puede controlar mediante la inclusión de agregados naturales.

#### 4.2. Resultados obtenidos para concretos fabricados en obra

En la Tabla 19, se presenta relación de los concretos elaborados en obra y laboratorio en función de la cantidad de reemplazo de agregado natural grueso.

*Tabla 19. ubicación y tipos de concretos fabricados. Fuente: Propia.*

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Obra</b>	<b>Laboratorio</b>
Concreto Referencia (0% reemplazo)	Ref	X	X
Concreto 10% reemplazo ARC	10%	X	
Concreto 20% reemplazo ARC	20%	X	X
Concreto 33% reemplazo ARC	33%	X	

#### 4.2.1. Asentamiento de los concretos fabricados en obra.

Como se describió en el capítulo anterior de metodología, inicialmente realizó el ensayo de asentamiento de los concretos. En la Figura 30 ilustra los ensayos de asentamiento para cada tipo de mezcla.

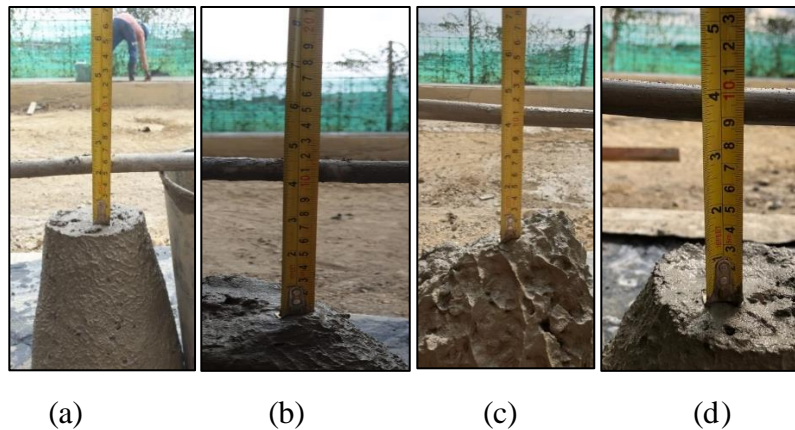


Figura 30. (a) Asentamiento concreto de referencia, (b) asentamiento concreto 10% reemplazo ARC, (c) asentamiento concreto 20% reemplazo ARC y (d) asentamiento concreto 33% reemplazo. Fuente: Propia.

Los resultados de los asentamientos se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Asentamiento de los diferentes concretos elaborados. Fuente: Propia

Tipo de Concreto	Asentamiento (cm)
Concreto Referencia (0% reemplazo)	4,8
Concreto 10% reemplazo ARC	10,0
Concreto 20% reemplazo ARC	9,8
Concreto 33% reemplazo ARC	8,7

Al analizar los valores obtenidos de asentamiento, como se puede observar en la Tabla 21 se evidencia un comportamiento decreciente en los concretos con incorporación de ARC. Es decir, a mayor porcentaje de reemplazo en volumen del ARC, menor fue el valor obtenido del asentamiento. Según Kumar (2017), la reducción del asentamiento de los concretos se puede

atribuir principalmente al cambio de la superficie y forma del agregado natural en comparación con el ARC.

La menor trabajabilidad del concreto de referencia podría explicarse por una menor cantidad de agua, no obstante, los agregados reciclados fueron pre saturados antes del mezclado.

#### 4.2.2. Resistencia a la compresión concretos fabricados en obra

Para esta propiedad se evaluaron para cada mezcla 3 especímenes en las edades de 7 y 28 días en condiciones de curado de inmersión, así mismo se evaluó el curado al aire para simular las condiciones de obra, de acuerdo a la metodología descrita anteriormente.

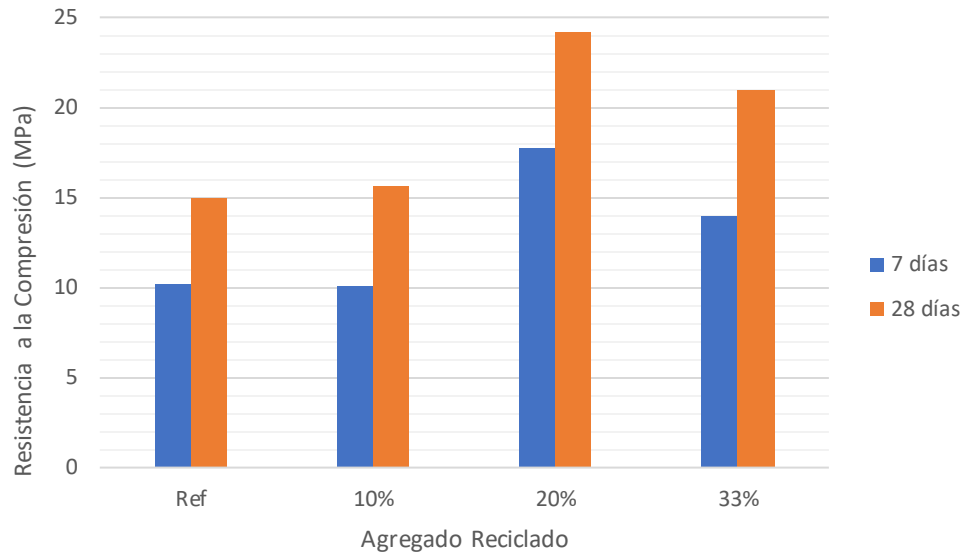
En la Tabla 21, se presentan los resultados promedio de la resistencia a compresión y su respectiva desviación estándar de las muestras cilíndricas en condiciones curado en inmersión, en las edades de 7 y 28 días.

Tabla 21. Resultados a compresión con curado en inmersión. Fuente: Propia.

Tipo de concreto	7 días			28 días		
	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar	# Datos	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar	# Datos
Referencia	10,19	0,81	3	15	0,51	3
10%	10,12	0,62	3	15,67	0,64	3
20%	17,79	0,29	3	24,19	1,1	3
33%	13,93	1,29	3	20,92	0,79	3

Como se puede observar en la Tabla 22, se tiene una baja dispersión de los datos obtenidos de los concretos ensayados a los 7 días a excepción del concreto con 33% de reemplazo. No obstante, en los concretos ensayados a los 28 días se tiene una mayor dispersión de datos en el concreto de 20% en condiciones de curado.

La Figura 31 ilustra la resistencia a compresión vs tipo de concreto, en las diferentes edades para un curado en inmersión.



*Figura 31. Resistencia a compresión de los diferentes concretos elaborados en obra y con curado en inmersión. Fuente: Propia.*

Según los datos obtenidos, como era de esperarse la resistencia de todos los concretos aumentó con la edad. Adicionalmente, se puede analizar un comportamiento similar en dos segmentos de los concretos. El primero, que incluye hasta la incorporación de ARC en un 10% y el segundo, que va del 20% hasta el 33% de incorporación de ARC. La resistencia a compresión incrementó significativamente cuando se incorporó mayor cantidad de agregado reciclado.

Cabe aclarar que este comportamiento no era el esperado, sin embargo, puede explicarse debido a la alta absorción del ARC con respecto al agregado natural grueso. Lo que significa, que el agua incorporada en la mezcla es absorbida por el ARC y reduce la relación agua/cemento, lo que traería como consecuencia el incremento en la resistencia.

En la Tabla 23. resume los resultados promedio por resistencia a compresión de las muestras cilíndricas en condiciones curado al aire, en las edades de 7 y 28 días.

Tabla 22. Resultados a compresión con curado al aire. Fuente: Propia.

Tipo de concreto	7 días			28 días		
	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar	# Datos	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar	# Datos
Referencia	10,69	0,18	3	14,47	0,27	3
10%	10,29	0,35	3	13,58	2,33	3
20%	16,54	1,01	3	21,12	0,79	3
33%	14,34	1,22	3	14,58	0,6	3

Como se puede observar en la Tabla 22, se tiene un comportamiento disperso de los datos obtenidos en dos concretos ensayados a los 7 días. Sin embargo, a los 28 días de edad se tiene una menor dispersión de datos. A excepción, del concreto con 10% de reemplazo con curado al aire.

La Figura 32 ilustra la resistencia a compresión vs tipo de concreto, en las diferentes edades para un curado al aire.

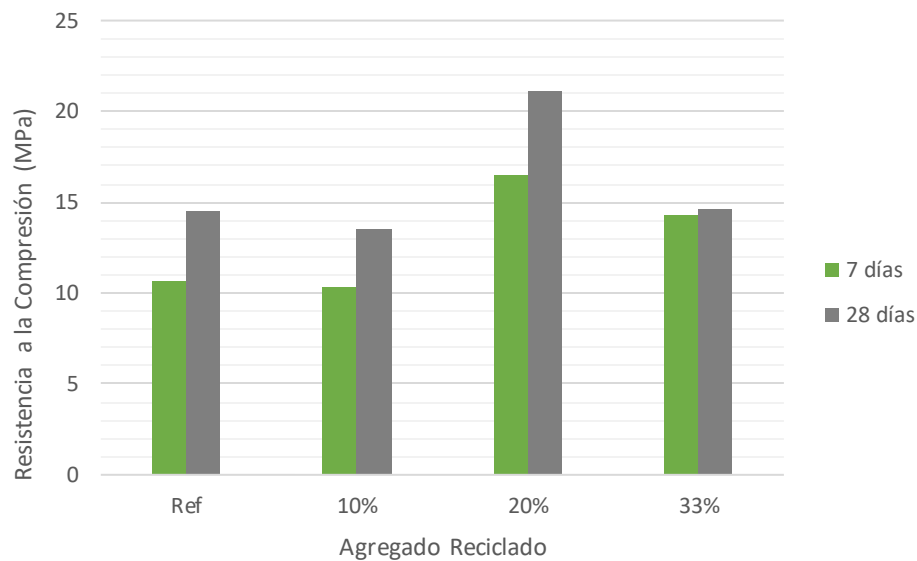


Figura 32. Resistencia a compresión de los diferentes concretos con curado al aire. Fuente: Propia.

En la Figura 32 se puede apreciar un incremento en la resistencia con el tiempo. adicionalmente, se tuvo una menor resistencia a compresión debido a su condición de curado al aire, lo cual, presenta perdidas de humedad en el interior de los especímenes y por consiguiente disminución en la resistencia a la compresión

Sin embargo, se puede ver el comportamiento del concreto con incorporación del 20% es estable con respecto el curado en inmersión. Por otro lado, el concreto con 33% de incorporación de ARC tuvo una baja de resistencia a la compresión y presentó valores similares en las diferentes edades. Esta pérdida, se le podría atribuir a la alta porosidad de los ARC, lo que representa en una facilidad para la pérdida de humedad del agregado reciclado.

Es importante mencionar, que el tipo de curado tuvo una influencia muy marcada en la resistencia a compresión a los 28 días, lo que demuestra la importancia de este procedimiento para garantizar el cumplimiento de las propiedades.

#### 4.2.3. Esclerometría.

El ensayo de esclerometría se ejecutó para los diferentes concretos elaborados en obra en las edades de 7 y 28 días. En la Tabla 24 presenta los resultados promedio de índices de rebote en la edad de 7 y 28 días.

Tabla 23. Índice de rebote promedio en la edad de 7 y 28 días. Fuente: Propia

Tipo de concreto	7 días	28 días
	Índice de rebote (Adimensional)	Índice de rebote (Adimensional)
Referencia	23,4	26,6
10%	25,18	26,47
20%	26,55	27,45
33%	26,23	28,57

Según Gómez Cortes (1987) en la medida que el índice de rebote sea mayor, teóricamente la resistencia a compresión debe serlo. Por ende, es razonable que los concretos con 20 y 33% brinden resultados con mayor resistencia a compresión con respecto los concretos de referencia y 10% de incorporación de ARC.

En la edad de 28 días el ensayo de esclerometría ofrece la misma tendencia con respecto a la edad de 7 días. Se logra percibir valores con mayores magnitudes en los índices de rebote de los concretos de 20 y 33% de reemplazo de ARC.

A raíz de los resultados obtenidos por el ensayo de esclerometría, es pertinente realizar una comparación gráfica del índice de rebote promedio vs la resistencia a compresión promedio en condiciones de curado en inmersión y al aire. La comparación se tabula de acuerdo los valores suministrados de resistencia a compresión en las Tablas 22 y 23.

En la Figura 33 se compara gráficamente el índice de rebote promedio vs resistencia a compresión promedio con curado en inmersión.

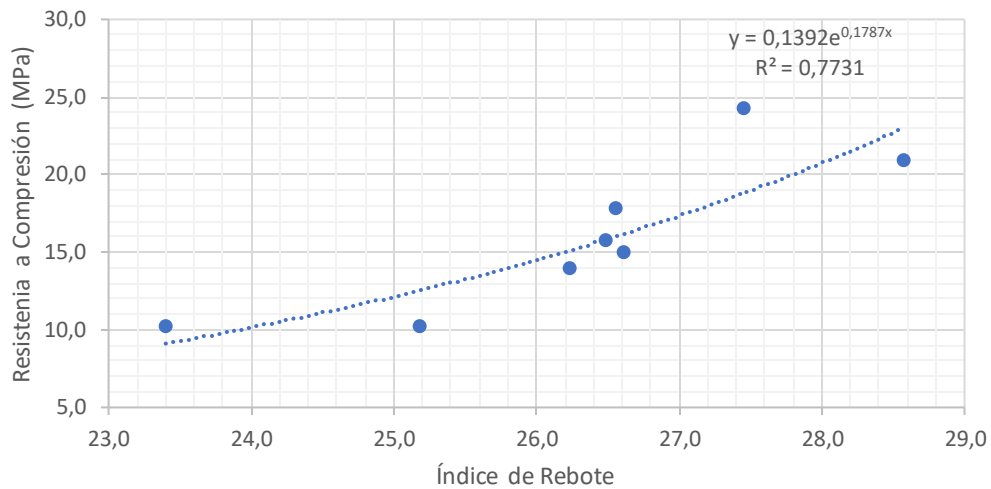


Figura 33. Índice de rebote vs resistencia a compresión: curado en inmersión. Fuente: Propia.

Por aparte, la Figura 33 se compara gráficamente el índice de rebote promedio vs resistencia a compresión promedio con curado al aire.

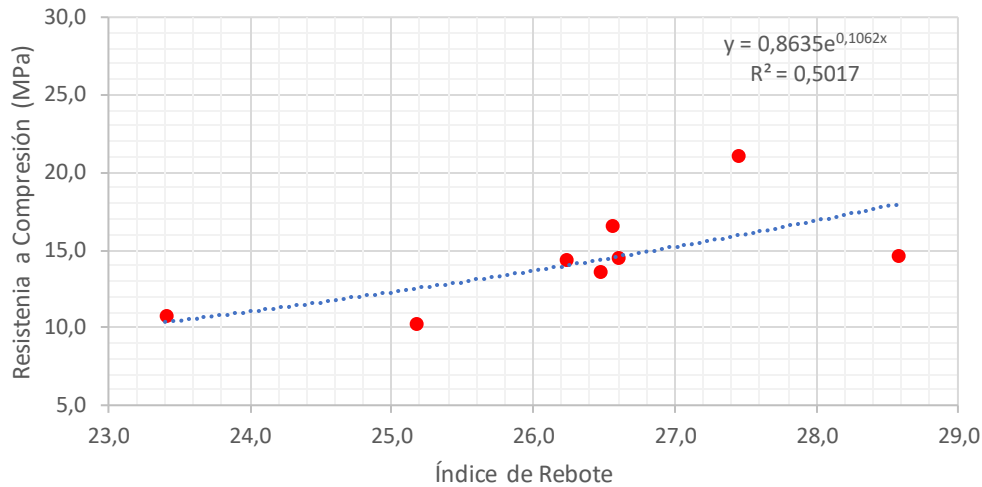


Figura 34. Índice de rebote vs resistencia a compresión: curado al aire. Fuente: Propia.

En las Figuras 33 y 34 se evidencia el comportamiento directamente proporcional entre la resistencia a compresión e índice de rebote. Es decir, a mayor resistencia a compresión, mayor es el índice de rebote. Lo anterior, se refleja en ambas Figuras donde la variable es el tipo de curado.

### 4.3. Resultados obtenidos por concretos fabricados en laboratorio

Con el objetivo de verificar el comportamiento mecánico encontrado en los concretos elaborados en la obra, se toma la decisión de fabricar en condiciones de laboratorio las dos clases de concreto más significativas para el proyecto, con una condición de curado en inmersión. A continuación, se presentan los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido.

#### 4.3.1. Asentamiento de los concretos fabricados en laboratorio

En la Figura 35 y la tabla 25 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de asentamiento en los dos tipos de concretos evaluados.



(a)

(b)

*Figura 35. (a) asentamiento concreto de referencia y (b) asentamiento concreto con 20% de incorporación de ARC. Fuente: Propia.*

Los resultados obtenidos por el ensayo de asentamiento, se presentan en la Tabla 25.

*Tabla 24. Resultados asentamientos de concretos fabricados en laboratorio. Fuente: Propia.*

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Asentamiento (cm)</b>
Concreto Referencia (0% reemplazo)	10
Concreto 20% reemplazo ARC	10,1

Como se puede observar, la trabajabilidad de los concretos fue la misma, esto está asociado con las condiciones controladas de laboratorio. Cabe aclarar que el ARC fue pre saturado de igual forma que en la obra.

#### **4.3.2. Resistencia a la compresión de los concretos fabricados en laboratorio**

De acuerdo a la metodología descrita anteriormente, se realizó el ensayo de compresión para un total de 12 especímenes. Se distribuyeron en: 3 especímenes en la edad de 7 días y 3 a los 28 días para el concreto de referencia. Del mismo modo, se realizó para el concreto con 20% de ARC. Es importante aclarar, que las doce muestras fueron curadas en inmersión.

En la Tabla 26. Se presentan los resultados promedio por resistencia a compresión de las muestras cilíndricas en condiciones curado en inmersión, en las edades de 7 y 28 días.

Tabla 25. Resultados a compresión con curado en inmersión. Fuente: Propia.

Tipo de concreto	7 días		28 días	
	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar	Esfuerzo F'c (MPa)	Desviación Estándar
Referencia	13,32	0,16	17,85	2,33
20%	12,59	0,29	18,3	0,67

La Figura 36 ilustra la resistencia a compresión vs tipo de concreto, en las diferentes edades para un curado en inmersión.

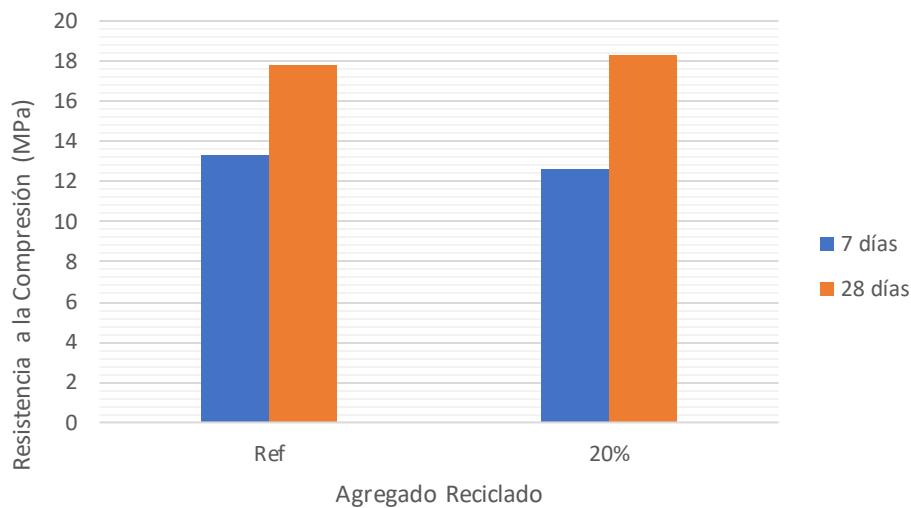


Figura 36. Resistencia a compresión de los concretos de referencia y 20% de reemplazo de ARC en condiciones de curado en inmersión. Fuente: Propia.

Los resultados de compresión obtenidos de los concretos fabricados en laboratorio presentaron diferentes comportamientos. A los 7 días de edad el concreto de referencia obtuvo más resistencia promedio con respecto al concreto de 20% de reemplazo de ARC. Sin embargo, los resultados a los 28 días variaron. El concreto con 20% de ARC obtuvo mayor resistencia promedio con respecto al de referencia.

De lo anterior, se puede concluir que la incorporación de ARC no tuvo una influencia significativa en la resistencia a compresión.

Es importante mencionar que en la fabricación de los diferentes concretos en obra y laboratorio, ofrecieron mayor resistencia a la compresión con la incorporación del ARC en un 20% en volumen. Esto toma importancia debido a que con esta cantidad de reemplazo podría técnicamente viabilizarse el aprovechamiento de los residuos cerámicos como agregados gruesos para la fabricación de concreto.

#### 4.3.3. Esclerometría de los concretos fabricados en laboratorio.

El ensayo de esclerometría se ejecutó para los diferentes concretos elaborados en obra en las edades de 7 y 28 días. En la Tabla 27 ilustra los resultados promedio de índices de rebote en la edad de 7 días.

Tabla 26. Índice de rebote promedio en la edad de 7 días. Fuente: Propia

Tipo de concreto	Índice de rebote (Adimensional)	
	(7 días)	(28 días)
Concreto Referencia (0% reemplazo)	13,33	16,77
Concreto 20% reemplazo ARC	14,22	16,88

En la Figura 37 se compara gráficamente el índice de rebote promedio vs resistencia a compresión promedio con curado en inmersión.

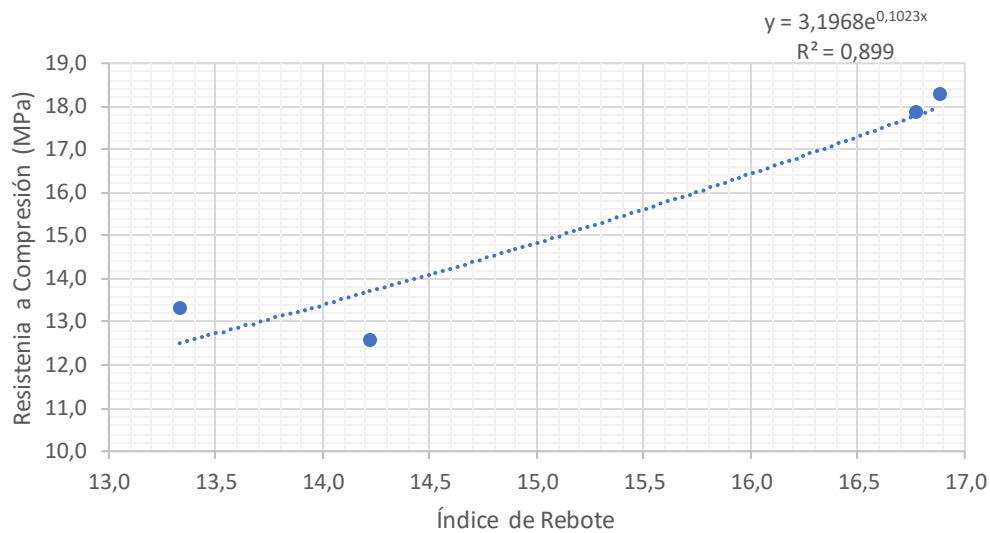


Figura 37. Índice de rebote vs resistencia a compresión. Fuente: Propia.

En la Figura 37, nuevamente se evidencia la tendencia directamente proporcional entre la resistencia a compresión e índice de rebote. Es decir, a mayor resistencia a compresión, mayor es el índice de rebote.

Es importante mencionar que el índice de rebote tuvo el mismo comportamiento de los resultados de resistencia a compresión de los concretos, por lo que se puede ser una herramienta útil para el estudio de las propiedades mecánicas por medio de ensayos no destructivos.

Finalmente, es importante realizar una comparación entre los resultados de esclerometría de los concretos fabricados en obra versus concretos fabricados en laboratorio como se puede observar en la Figura 38. Para ello, se utilizaron dos tipos de concretos en común (Ref y 20%).

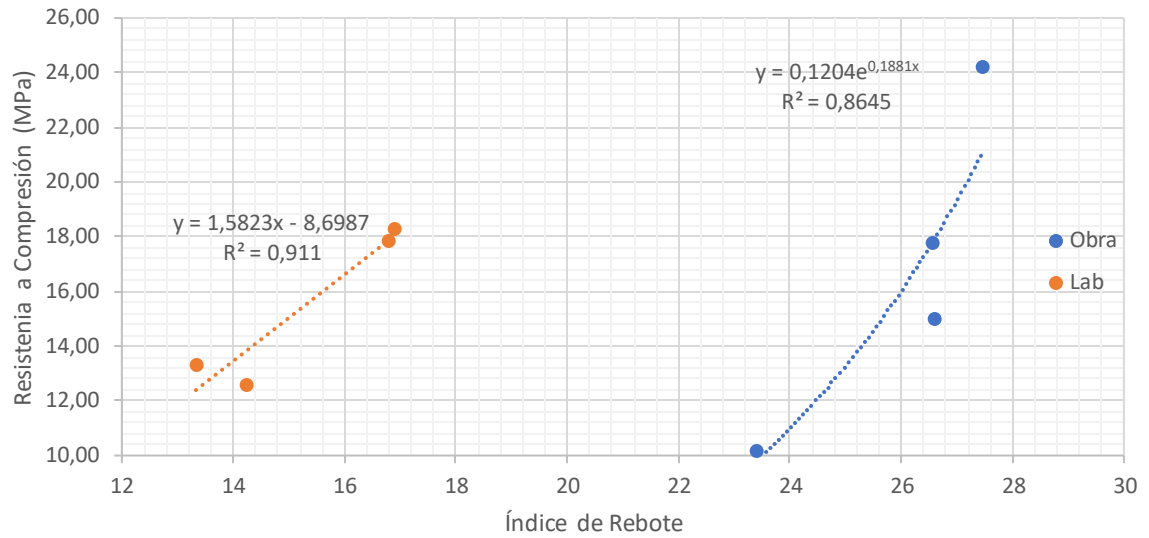


Figura 38. Índice de rebote vs resistencia a compresión de concretos fabricados en obra y laboratorio.  
Fuente: Propia.

Los resultados comparativos presentaron diferentes comportamientos a lo que se refiere en índice de rebote y resistencia a compresión. Se obtuvo un menor índice de rebote en los concretos fabricados en laboratorio, lo cual, se le puede atribuir a la masa del elemento ensayado. Sin embargo, en los resultados de resistencia a compresión, se observa una mayor dispersión en los concretos de obra, debido a las condiciones no controladas. Por ejemplo, control en la saturación previa de los ARC.

## 5. CONCLUSIONES

Luego de cumplir con el programa experimental diseñado para cumplir con los diferentes objetivos propuestos, se mencionan las siguientes conclusiones:

La actividad que pueda generar mayor potencial de aprovechamiento fue los andenes peatonales. Es fundamental el análisis desde la planeación de la actividad de obra que, por su logística, volumen de material, pandemia y cumplimiento de la resolución 0472.

Se puede concluir que técnicamente es factible producir agregados reciclados y es necesario que las empresas constructoras inviertan en equipos para el tratamiento y posterior aprovechamiento de los residuos en obra. Es importante mencionar, que los residuos cerámicos, seleccionados de la cortadora, no presentan gran complejidad para su gestión debido que se consideran residuos “limpios” y con facilidad de aprovechamiento en numerosas actividades en la construcción.

La caracterización de los agregados reciclados cerámicos, en el mayor de los casos están dentro de los límites de las normativas. Sin embargo, existen dos factores importantes a tener en cuenta. Los ARC tienen una alta absorción y es necesario tener un ajuste de humedad previamente al proceso de fundición. Finalmente, la pérdida por desgaste en los ARC es muy elevada, por lo cual, su porcentaje de incorporación no debe ser el 100% y debe haber sustitución por agregado natural.

Se demostró en los diferentes resultados y procedimientos que el ARC puede ser utilizado como materia prima de agregados gruesos para la fabricación de concretos no estructurales y que el 20% de reemplazo no tuvo efectos negativos en la resistencia a la compresión del concreto. Adicionalmente, los concretos con incorporación de ARC, ofrecieron mejores resultados de resistencia a compresión. Este factor se le atribuye debido a la alta absorción del ARC. Por ende, se recomienda una correcta saturación a los ARC antes del proceso de mezclado y así, no afectar el agua de diseño de mezcla.

Se evidencia que es posible la producción de Agregados Reciclados Cerámicos y aprovechamiento para la fabricación de concretos no estructurales en obra, cumpliendo con la Normatividad Colombiana para la producción de concretos.

Finalmente, con el desarrollo del presente trabajo se promueve el uso de Agregados Reciclados Cerámicos para la fabricación de diferentes tipos de concretos. Considerando la importancia de conservación del planeta, impacto positivo en la economía de los proyectos de infraestructura y cumplimiento con la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia.

### **5.1. Recomendaciones técnicas**

De acuerdo con los resultados obtenidos y para el correcto desarrollo de futuros proyectos con la incorporación de ARC en concretos no estructurales fabricados en obra, se recomienda lo siguiente:

- Ejecutar una prueba piloto de los concretos previamente a la fundición. Esto es relevante para comprobar correctamente las diferentes variables para la producción de concretos. Por ejemplo, diseño de mezcla.
- Tener completa disposición de la mano de obra, equipos e insumos para la fabricación de concretos.
- Completo control en las humedades de los agregados, en la toma de especímenes y en el curado de los mismos. A causa, de evitar posibles alteraciones en los resultados.
- Realizar los diferentes ensayos para la caracterización de los materiales y así tener una clara visión en las interpretaciones de los resultados.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2017). *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*. Auckland: ELSEVIER. doi:10.1016
- Armijos Tinoco, J. V. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN EN SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL, EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI*. Tesis Maestría, Cali.
- Blanco, E. A. (2014). *Tecnología mineralúrgica*. Santander: open course ware.
- Bravo German, A. M., & Bravo Gómez, I. D. (2019). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETO FABRICADO CON AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DE ADOQUINES*. Tesis Maestría, Cali.
- Cancino Rueda, P. J., & Plata Serrano, F. G. (2011). *ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE DESPERDICIOS DE MAMPOSTERÍA EN EDIFICACIONES*. Tesis para optar título de especialización, Bucaramanga.
- Castillo González, S. A., & Inostroza Hernández, M. J. (2013). *ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MEDIANTE ULTRASONIDO EN EQUIPOS TERMICOS*. Tesis, UNIVERSIDAD DEL BIO BIO, Bio Bio. Recuperado el 2020, de [http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/798/1/Castillo\\_Gonzalez\\_Sergio.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/798/1/Castillo_Gonzalez_Sergio.pdf)
- Consejo y Parlamento Europeo. (2008). *DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas*. Union Europea.
- Correia, J. R., De Brito, J., & Pereira, A. S. (2005). *Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates*. Lisboa: Materials and structures. doi:10.1617/s11527-005-9014-7
- Diosa Arenas, J. S. (2020). *Análisis experimental de las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia fabricado con Agregados Reciclados de Concreto*. Tesis Maestría, Cali.

- European Commission. (2017). *Euro statistic*. Obtenido de [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics/es#Generaci.C3.B3n\\_total\\_de\\_residuos](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/es#Generaci.C3.B3n_total_de_residuos)
- Gomes, M., & de Brito, J. (2008). *Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance*. Lisboa: RILEM. doi:10.1617/s11527-008-9411-9
- Gomez Cortes, J. G. (1987). Determinación del índice esclerométrico en hormigones: factores que lo afectan. *Ingeniería E investigación*, 31-38. Obtenido de [revistas.unal.edu.co/index.php/ingev/article/view/21576](http://revistas.unal.edu.co/index.php/ingev/article/view/21576)
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *Ánisis granulométrico de agregados gruesos y finos*. Norma, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *DENSIDAD BULK (PESO UNITARIO) Y PORCENTAJE DE VACÍOS DE LOS AGREGADOS COMPACTADOS O SUELTOS*. Norma, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *Densidad del cemento hidráulico*. Norma, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato micro-deval*. Norma, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *Gravedad específica y absorción de los agregados*. Norma, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *MÉTODO PARA DETERMINAR EL ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EN EL CONCRETO ENDURECIDO*. Bogotá: INVÍAS.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). *Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los Ángeles*. Norma, Bogotá.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *MÉTODO PARA DETERMINAR EL ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EN EL CONCRETO ENDURECIDO*. I.N.V. E-143-07, 1-4. Recuperado el 2020

- Kumar, R. (2017). Influence of recycled coarse aggregated derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *ELSEVIER*, 248-255. doi:10.1016
- Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *ELSEVIER*, 16. Recuperado el 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000559?via%3Dihub>
- Lum Wong, C., Hung Mo, K., Poh Yap, S., Alengaram, J. U., & Chai Ling, T. (2018). Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of cleaner Production*, 226-237. doi:Journal of Cleaner Production 195 (2018) 226e239
- Maat . (26 de Abril de 2019). *Maat Soluciones ambientales*. Obtenido de <https://www.maat.com.co/eventos/webinar-normatividad-para-la-gestion-de-r cds-distrital-y-nacional/>
- Marín Orrego, J. A. (2019). *ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN UN PROYECTO INSTITUCIONAL: ESTUDIO DE CASO*. Tesis, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Facultad de ingeniería , Cali. Recuperado el 2020
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (28 de Febrero de 2017). Por la cual se reglamenta la gestion integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición -RCD y se dictan otras disposiciones. *Resolucion 0472* , pág. 18.
- Naciones Unidas. (2019). *Población*. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (1992). *MÉTODO DEL ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO*. BOGOTÁ: ICONTEC.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (1995). *MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO*. BOGOTÁ: ICONTEC.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (1999). *MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO*. BOGOTÁ: ICONTEC.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (2000). *ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALES DE CONCRETO*. BOGOTÁ: ICONTEC.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (2006). *MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37,5 mm, UTILIZANDO LA MAQUINA DE LOS ÁNGELES*. BOGOTÁ: ICONTEC.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (2006). *Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la máquina de los Ángeles*. Bogotá: NTC.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (2007). *MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS*. BOGOTÁ: ICONTEC.

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2009). *Construction and Building Materials*. ELSEVIER, 7. Recuperado el 2019, de [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat)

Pérez Rojas, Á. V. (2012). Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto. *INGENIUM*(26), 116-125. Recuperado el 2020, de <file:///C:/Users/usuario/Downloads/Dialnet-UsodeTrituradoDeLadrilloRecicladoComoAgregadoGrueso-5038429.pdf>

Pérez Rojas, Á. V. (2012). Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración del concreto. *INGENIUM*, 116-125.

Polanco Rodríguez, A. (2012). *Manual de prácticas de Laboratorio de Concreto*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua. Obtenido de [http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL\\_LAB\\_DE\\_CONCRETO.pdf](http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf)

Secretaría distrital de ambiente- Alcaldía de Bogotá. (2014). *Gestión integral de RCD*. Guía, Bogotá. Recuperado el 2020

United Nations Environment Programme. (2012). *New Move to develop Global Standards for Measuring Energy Use in Buildings*.

UNIVERSIDAD CENTRO AMERICANA. (s.f.). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso*. San Salvador: Universidad Centroamericana. Obtenido de <http://www.uca.edu.sv/mecanica->

estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20gravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregado%20grueso.pdf

Universidad Nacional de Colombia. (2017). *Instituto de Estudios Ambientales IDEA*. Bogotá.

Recuperado el Octubre de 2019

## 7. GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES

*Escombros*: Residuo resultante de las actividades de construcción, reparación, demolición y/o mejoras locativas de las obras civiles o de otras actividades conexas.

*Planeación*: aspectos necesarios para lograr los objetivos, permite controlar todos los aspectos del proyecto.

*Gestor de RCD*: Persona natural o jurídica que podría realizar una o todas las actividades de recolección, transporte, almacenamiento, aprovechamiento y/o disposición final de RCD.

*Gran generador de RCD*: Constructor que cumple con las siguientes condiciones: 1) requiere la expedición de licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades y/o licencia de intervención y ocupación del espacio público y 2) la obra tenga un área construida igual o superior a 2000 m<sup>2</sup>.

*Impacto ambiental*: Cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al proyecto.

*Plan de Gestión de Residuos*: Instrumento de gestión que contiene la información de la obra y de las actividades que se deben realizar para garantizar a gestión de los RCD generados.


*Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*: Residuos sólitos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas.

*Agregado Reciclado (AR)*: Agregados provenientes de las actividades de construcción, demolición y algunos residuos de materiales que tendrán un aprovechamiento


*Agregado Reciclado Cerámico (ARC)*: Agregados reciclado provenientes de las unidades de arcilla cocida, ladrillos, tejas, etc.

## 8. ANEXOS


*Anexo 1. Densidad Bulk fino RCD. Fuente: Propia.*

	<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES</b> SUELTOS L.N.V. E - 217				
<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1		
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL</b>	FINO RCD	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA</b>	09/12/2019	<b>HOJA No.</b>	1 DE: 1	
<b>AGREGADOS COMPACTADOS</b>					
Método de compactación					<b>PROMEDIO</b>
Ensayo No.		1	2	3	
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	4,091	4,143	4,148	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	0,245	0,245	0,245	
Volumen del recipiente de medida, L	(V)	2,78	2,78	2,78	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Densidad bulk del agregado, kg/L</b>	<b>M</b>	<b>1,383</b>	<b>1,402</b>	<b>1,404</b>	<b>1,397</b>
<b>AGREGADOS SUELTOS</b>					
Ensayo No.		1	2	3	<b>PROMEDIO</b>
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	3,764	3,75	3,742	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	0,245	0,245	0,245	
Volumen del recipiente de medida, m <sup>3</sup>	(V)	2,78	2,78	2,78	<b>2,78</b>
<b>CALCULOS</b>					
<b>Densidad bulk del agregado, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>M</b>	<b>1,27</b>	<b>1,26</b>	<b>1,26</b>	<b>1,26</b>


Anexo 2. Densidad Bulk grueso RCD. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES</b> SUELTOS L.N.V. E - 217			
		<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1
<b>CRIPCIÓN DEL MATER</b>	FINO RCD	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA</b>	09/12/2019	<b>HOJA No.</b>	1	<b>DE: 1</b>
<b>AGREGADOS COMPACTADOS</b>					
Método de compactación					<b>PROMEDIO</b>
Ensayo No.			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	19,25	19,32	19,21	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	8,35	8,35	8,35	
Volumen del recipiente de medida, l	(V)	9,68	9,68	9,68	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Densidad bulk del agregado, kg/l</b>	<b>M</b>	<b>1,13</b>	<b>1,13</b>	<b>1,12</b>	<b>1,13</b>
<b>AGREGADOS SUELTOS</b>					
Ensayo No.			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	18,35	18,1	18,15	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	8,35	8,35	8,35	
Volumen del recipiente de medida, m <sup>3</sup>	(V)	9,68	9,68	9,68	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Densidad bulk del agregado, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>M</b>	<b>1,03</b>	<b>1,01</b>	<b>1,01</b>	<b>1,02</b>


Anexo 3. Granulometría Agregado Fino. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL</b> <b>LABORATORIO DE MATERIALES</b> <b>ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS L.N.V.E 213-07</b> <b>MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL</b>					
		<b>PROYECTO</b> Proyecto de grado Maestria				<b>LOTE</b> 1	
		<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b> Arena Rio Cauca				<b>MUESTRA</b> 1	
		<b>CLASIFICACION</b> Arena Media		<b>FECHA</b> 09/09/2020		<b>HOJA No.</b> 1	
<b>Peso Inicial seco antes de lavado (g)</b>			<b>618,8</b>				
<b>Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)</b>			<b>614,5</b>				
Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	NTC 32 (ASTME 11)	
						Limite inferior	Limite superior
3/8	9,50	58,3	9	9	91	100	100
No 4	4,75	20,6	3	13	87	95	100
No 8	2,38	10	2	14	86	80	100
No 16	1,19	14,1	2	17	83	50	85
No 30	0,59	30,2	5	22	78	25	60
No 50	0,30	147,7	24	45	55	10	30
No 100	0,15	220,5	36	81	19	2	10
No 200	0,07	78,4	13	94	6		
Fondo		39	6	100	0		
Sumatoria		618,8					
				MF	2,0		
				TMN	3/8"		
				TM	1/2"		


Anexo 4. Granulometría Agregado Grueso. Fuente: Propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS L.N.V.E 213-07 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL									
		PROYECTO				Proyecto de grado Maestria		LOTE	1		
		DESCRIPCION DEL MATERIAL				Agregado grueso utilizado en fundición		MUESTRA	1		
		CLASIFICACION				Grava	FECHA	09/09/2020	HOJA No.	1	DE 1
		Peso Inicial seco antes de lavado (g)				4148,4					
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)											
Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	NTC 174 (Quinta Actualización)					
						Limite inferior	Limite superior				
1	25,40	0	0	0	100	90	100				
3/4	19,10	1156	27,9	27,9	72	40	85				
1/2	12,70	1747,1	42,1	70,0	30	10	40				
3/8	9,50	718,6	17,3	87,3	12,7	0	15				
No 4	4,75	375,6	9,1	96,4	3,6	0	5				
No 8	2,38	0	0,0	96,4							
No 16	1,19	0	0,0	96,4							
No 30	0,59	0	0,0	96,4							
No 50	0,30	0	0,0	96,4							
No 100	0,15	0	0,0	96,4							
Fondo		149	3,6	100	0						
Sumatoria		4146,3									
				MF	6,9						
				TMN	1"						
				TM	1 1/2"						


Anexo 5. Granulometría ARC. Fuente: Propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS L.N.V.E 213-07 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
		PROYECTO Proyecto de grado Maestria			LOTE 1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL Caracterizacion RCD		MUESTRA 1					
CLASIFICACION ARC		FECHA 09/12/2019		HOJA No. 1 DE 1			
Peso Inicial seco antes de lavado (g)		4339,145					
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)							
Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	NTC 174 (Quinta Actualización)	
						Limite inferior	Limite superior
1	25,40	0	0	0	100	100	100
3/4	19,10	0	0,0	0,0	100	90	100
1/2	12,70	1738	40,1	40,1	59,9	55	78
3/8	9,50	1488	34,3	74,3	25,7	20	55
No 4	4,75	1113	25,7	100,0	0,003	0	10
No 8	2,38	0,072	0,00	100,0	0,002		
No 16	1,19	0,01	0,00	100,0	0,001		
No 30	0,60	0	0,00	100,0			
No 50	0,30	0	0,00	100,0			
No 100	0,15	0	0,00	100,0			
Fondo		0,063	0,001452	100	0		
Sumatoria		4339,145					
				MF	6,7		
				TMN	3/4"		
				TM	1"		


Anexo 6. Gravedad específica Fino RCD. Fuente: Propia.

 <p style="text-align: center;"> <b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b>  <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b>  <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS</b>  <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS</b>  <b>I.N.V.E - 222</b> </p>					
<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1		
<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b>	ARC	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA</b>	09/12/2019	<b>HOJA No.</b>	1 DE: 1	
<b>Ensayo No.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Picnómetro No.</b>		4	6	13	
<b>Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g</b>	(S)	500	500	500	
<b>Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g</b>	(C)	927,9	926,7	927,7	
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>		29	28	28,5	
<b>Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g</b>	(B)	645	644,4	643,9	
<b>Masa al aire de la muestra de seca al horno, g</b>	(A)	443,2	443,4	443,9	
<b>CALCULOS</b>					<b>PROMEDIO</b>
<b>Gravedad específica bulk,</b>	<b>Gsb</b>	<b>2,041</b>	<b>2,037</b>	<b>2,053</b>	<b>2,044</b>
<b>Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,</b>	<b>Gsb sss</b>	<b>2,303</b>	<b>2,297</b>	<b>2,313</b>	<b>2,304</b>
<b>Gravedad específica aparente,</b>	<b>Gsa</b>	<b>2,765</b>	<b>2,752</b>	<b>2,773</b>	<b>2,763</b>
<b>Absorción</b>	<b>%Abs</b>	<b>12,816</b>	<b>12,765</b>	<b>12,638</b>	<b>12,740</b>


Anexo 7. Gravedad específica arena fundición. Fuente: Propia.

 <p style="text-align: center;"> <b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b>  <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b>  <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS</b>  <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS</b>                      I.N.V. E - 222                 </p>					
<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO DE MAESTRÍA		<b>LOTE</b>	1	
<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b>	ARENA DE RÍO UTILIZADA EN FUNDICIÓN		<b>MUESTRA</b>	1	
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA</b>	09/09/2020	<b>HOJA No.</b>	1 DE: 1	
<b>Ensayo No.</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Picnómetro No.</b>			1	2	3
<b>Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g</b>	(S)	310	310	310	
<b>Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g</b>	(C)	849,8	849,3	846,7	
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>		25	25	24,5	
<b>Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g</b>	(B)	644,6	644,1	643,5	
<b>Masa al aire de la muestra de seca al horno, g</b>	(A)	307,2	306,9	307,4	
<b>CALCULOS</b>					<b>PROMEDIO</b>
<b>Gravedad especifica bulk,</b>	<b>Gsb</b>	<b>2,931</b>	<b>2,928</b>	<b>2,878</b>	<b>2,913</b>
<b>Gravedad especifica bulk saturada y superficialmente seca,</b>	<b>Gsb sss</b>	<b>2,958</b>	<b>2,958</b>	<b>2,903</b>	<b>2,940</b>
<b>Gravedad especifica aparente,</b>	<b>Gsa</b>	<b>3,012</b>	<b>3,018</b>	<b>2,950</b>	<b>2,993</b>
<b>Absorción</b>	<b>%Abs</b>	<b>0,911</b>	<b>1,010</b>	<b>0,846</b>	<b>0,922</b>


Anexo 8. Gravedad específica grueso RCD. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES</b> <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS</b> <b>LN.V. E - 223</b>			
		<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO DE MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1
<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b>	Caracterización RCD	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA LAF</b> 09/12/2019	<b>HOJA No.</b>	1	<b>DE: 1</b>	
<b>Ensayo No.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g	(B)	435,5	513,3	<b>514,9</b>	
Masa de la muestra sumergida en agua, g	(C)	236,9	279,1	<b>280,3</b>	
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g	(A)	372,6	439,1	<b>441,3</b>	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Gravedad específica bulk,</b>	<b>Gsb</b>	<b>1,876</b>	<b>1,875</b>	<b>1,881</b>	<b>PROMEDIO</b> 1,877
<b>Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,</b>	<b>Gsb sss</b>	<b>2,193</b>	<b>2,192</b>	<b>2,195</b>	<b>2,193</b>
<b>Gravedad específica aparente,</b>	<b>Gsa</b>	<b>2,746</b>	<b>2,744</b>	<b>2,741</b>	<b>2,744</b>
<b>Absorción</b>	<b>%Abs</b>	<b>16,88</b>	<b>16,90</b>	<b>16,68</b>	<b>16,819</b>


Anexo 9. Gravedad específica grava fundición. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES</b> <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS</b> <b>LN.V. E - 223</b>			
		<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO DE MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1
<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b>	Agregado grueso Fundición obra.	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA LAF</b> 09/09/2020	<b>HOJA No.</b>	1	<b>DE:1</b>	
<b>Ensayo No.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g	(B)	996,2	1174,8	<b>952,6</b>	
Masa de la muestra sumergida en agua, g	(C)	653,5	703,8	<b>623,2</b>	
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g	(A)	986,2	1062,6	<b>943,1</b>	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Gravedad específica bulk,</b>	<b>Gsb</b>	<b>2,878</b>	<b>2,256</b>	<b>2,863</b>	<b>PROMEDIO</b> 2,666
<b>Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,</b>	<b>Gsb sss</b>	<b>2,907</b>	<b>2,494</b>	<b>2,892</b>	<b>2,764</b>
<b>Gravedad específica aparente,</b>	<b>Gsa</b>	<b>2,964</b>	<b>2,962</b>	<b>2,948</b>	<b>2,958</b>
<b>Absorción</b>	<b>%Abs</b>	<b>1,01</b>	<b>10,56</b>	<b>1,01</b>	<b>4,193</b>

Anexo 10. Peso específico del cemento. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES</b> <b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS</b> I.N.V. E - 307			
		<b>PROYECTO</b>	PROYECTO DE GRADO MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1
<b>DESCRIPCION DEL MATERIAL</b>	CEMENTO USADO EN OBRA	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>	<b>FECHA LAE</b>	09/09/2020	<b>HOJA No.</b>	1 DE: 1	
<b>Ensayo No.</b>		1	2	3	
<b>Masa sin cemento (g)</b>		313,55	313,7	306,44	
<b>Masa con cemento (g)</b>		377,31	376,9	370,06	
<b>Diferencia masa (<math>\Delta m</math>)</b>		63,76	63,2	63,62	
<b>Lectura inicial (Li)</b>		1	1	1,2	
<b>Lectura Final (Lf)</b>		22,3	22,3	22,2	
<b>Diferencia Volumen (<math>\Delta v</math>)</b>		21,3	21,3	21	
<b>CALCULOS</b>					
<b>Densidad del cemento (<math>\rho</math>)</b>	$\rho$	2,993	2,967	3,030	<b>PROMEDIO</b> 2,997

Anexo 11. Resistencia al desgaste del RCD. Fuente: Propia.

		<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL</b> <b>LABORATORIO DE PAVIMENTOS</b> <b>RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS LN.V.E.- 219</b>				
		<b>PROYECTO</b>		PROYECTO DE GRADO MAESTRÍA	<b>LOTE</b>	1
<b>DESCRIPCION DEL MA</b>		RCD PAISAJE DE LAS FLORES	<b>MUESTRA</b>	1		
<b>CLASIFICACION</b>		<b>FECHA</b>	09/12/2019	<b>HOJA No.</b>	1 DE: 1	
<b>PRUEBAS</b>		1	2	3	4	5
Gradacion usada		B				
No. de esferas		11				
No. de revoluciones		500				
Pa peso de la muestra seca antes del ensayo <b>g</b>		5000				
Pb peso muestra seca despues del ensayo y despues de lavar sobre tamiz No. 12 <b>g</b>		2086				
Pa- Pb = Perdida <b>g</b>		2914				
% Desgaste = (Pa - Pb)/ Pa x 100		58,3				

Anexo 12. Humedades fundición obra. Fuente: Propia.

<b>HUMEDADES FUNDICIÓN OBRA</b>			
<b>Grava</b>			
Peso recipiente	106,7		
peso inicial	602,5	495,8	<b>H%</b>
peso seco	597,8	491,1	<b>0,95703523</b>
<b>Arena</b>			
Peso recipiente	105,5		
peso inicial	608,6	503,1	<b>H%</b>
peso seco	580,9	475,4	<b>5,82667228</b>

Anexo 13. Humedades fundición laboratorio. Fuente: Propia.

<b>HUMEDADES FUNDICIÓN LABORATORIO</b>			
<b>Grava</b>			
Peso recipiente	102,1		<b>H%</b>
peso inicial	520,4	418,3	<b>0,84378014</b>
peso seco	516,9	414,8	
<b>Arena</b>			
Peso recipiente	105		
peso inicial	625,2	520,2	<b>H%</b>
peso seco	575,5	470,5	<b>10,5632306</b>
<b>ARC</b>			
Peso recipiente	106,4		
peso inicial	529,8	423,4	<b>H%</b>
peso seco	511,6	405,2	<b>4,49160908</b>

Anexo 14. Resultados de resistencia a compresión concreto convencional en obra. Fuente: Propia.

TIPO DE CONCRETO	#	TIPO DE CURADO	EDAD DE ENSAYO	ALTURA (m)	DIAMETRO (m)	AREA (m <sup>2</sup> )	PESO (g)	RESULTADO (KN)	F'c (kN/m <sup>2</sup> )	F'c (MPa)	PROMEDIO (Mpa)
CONCRETO CONVENCIONAL	1	CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 7 DÍAS (3/julio/2020)	0,2	0,1	0,007853982	3771	86,2	10975,32488	10,98	10,19
	2		0,2	0,1	0,007853982	3805	80,4	10236,84594	10,24		
	3		0,2	0,102	0,008171282	3815	76,5	9362,055476	9,36		
	7		ENSAYO 28 DÍAS (24/07/2020)	0,2	0,099	0,007697687	3804	119,2	15485,17026	15,49	15,00
	8		0,2	0,099	0,007697687	3768	111,3	14458,888	14,46		
	9		0,2	0,099	0,007697687	3795	115,8	15043,47916	15,04		
	4	CURADO AL AIRE	ENSAYO 7 DÍAS (3/julio/2020)	0,2	0,1	0,007853982	3591	84,5	10758,87415	10,76	10,69
	5		0,2	0,1	0,007853982	3574	82,4	10491,49385	10,49		
	6		0,2	0,1	0,007853982	3644	85	10822,53613	10,82		
	10		ENSAYO 28 DÍAS (24/07/2020)	0,2	0,1	0,007853982	3562	113	14387,60686	14,39	14,47
	11		0,2	0,1	0,007853982	3619	116	14769,57872	14,77		
	12		0,2	0,1	0,007853982	3614	112	14260,2829	14,26		

Anexo 15. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 10%ARC en obra. Fuente: Propia.

TIPO DE CONCRETO	#	CURADO/S IN CURADO	EDAD DE ENSAYO	ALTURA (m)	DIAMETRO (m)	AREA (m <sup>2</sup> )	PESO (g)	RESULTADO (KN)	F'c (kN/m <sup>2</sup> )	F'c (MPa)	PROMEDIO (Mpa)
CONCRETO REEMPLAZADO 10%	1	CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 7 DÍAS (3/julio/2020)	0,202	0,1	0,007853982	3820	76,9	9791,212099	9,79	10,12
	2		0,2	0,1	0,007853982	3775	85,1	10835,26853	10,84		
	3		0,2	0,102	0,008171282	3739	79,6	9741,432887	9,74		
	7		ENSAYO 28 DÍAS (24/07/2020)	0,2	0,099	0,007697687	3753	126,2	16394,53429	16,39	15,67
	8		0,2	0,099	0,007697687	3820	117	15199,37014	15,20		
	9		0,2	0,099	0,007697687	3830	118,6	15407,22477	15,41		
	4	CURADO AL AIRE	ENSAYO 7 DÍAS (3/julio/2020)	0,2	0,1	0,007853982	3677	79,3	10096,78959	10,10	10,29
	5		0,2	0,1	0,007853982	3596	84	10695,21218	10,70		
	6		0,2	0,1	0,007853982	3644	79,1	10071,3248	10,07		
	10		ENSAYO 28 DÍAS (24/07/2020)	0,2	0,097	0,007389811	3572	109,7	14844,76332	14,84	13,58
	11		0,2	0,1	0,007853982	3615	117,8	14998,76184	15,00		
	12		0,2	0,098	0,007542964	3983	82,1	10884,31556	10,88		

Anexo 16. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 20%ARC en obra. Fuente: Propia.

TIPO DE CONCRETO	#	CURADO/S IN CURADO	EDAD DE ENSAYO	ALTURA (m)	DIAMETRO (m)	AREA (m2)	PESO (g)	RESULTADO (KN)	F'c (kN/m2)	F'c (MPa)	PROMEDIO (Mpa)	
CONCRETO RCPTLDAZO 20%	1	CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 7	0,202	0,1	0,007853982	4165	137,3	17481,57895	17,48	17,79	
	2		DÍAS	0,202	0,102	0,008171282	4150	147,6	18063,25998	18,06		
	3		(3/julio/2020)	0,2	0,1	0,007853982	4186	139,9	17812,62123	17,81		
	7		CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 28	0,2	0,101	0,008011847	4163	188,2	23490,21491	23,49	24,19
	8			DÍAS	0,2	0,101	0,008011847	4186	204	25462,29459	25,46	
	9			(24/07/2020)	0,201	0,1	0,007853982	4166	185,6	23631,32595	23,63	
	4	CURADO AL AIRE	ENSAYO 7	0,202	0,1	0,007853982	4050	124,4	15839,09994	15,84	16,54	
	5		DÍAS	0,2	0,1	0,007853982	3965	139	17698,02967	17,70		
	6		(3/julio/2020)	0,2	0,102	0,008171282	3978	131,3	16068,46907	16,07		
	10		CURADO AL AIRE	ENSAYO 28	0,2	0,1	0,007853982	4030	170,8	21746,93142	21,75	21,12
	11			DÍAS	0,2	0,101	0,008011847	4032	171,2	21368,35703	21,37	
	12			(24/07/2020)	0,2	0,1	0,007853982	4036	158,9	20231,77637	20,23	

Anexo 17. Resultados resistencia a compresión concreto con incorporación 33%ARC en obra. Fuente: Propia.

TIPO DE CONCRETO	#	CURADO/S IN CURADO	EDAD DE ENSAYO	ALTURA (m)	DIAMETRO (m)	AREA (m2)	PESO (g)	RESULTADO (KN)	F'c (kN/m2)	F'c (MPa)	PROMEDIO (Mpa)	
CONCRETO RCPTLDAZO 33%	1	CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 7	0,2	0,1	0,007853982	3821	106,1	13509,07157	13,51	13,93	
	2		DÍAS	0,202	0,102	0,008171282	3822	125,7	15383,14214	15,38		
	3		(3/julio/2020)	0,2	0,1	0,007853982	3772	101,3	12897,91659	12,90		
	7		CURADO EN INMERSIÓN	ENSAYO 28	0,2	0,098	0,007542964	3827	155,7	20641,75314	20,64	20,92
	8			DÍAS	0,2	0,099	0,007697687	3811	156,3	20304,7996	20,30	
	9			(24/07/2020)	0,2	0,101	0,008011847	4015	174,7	21805,21012	21,81	
	4	CURADO AL AIRE	ENSAYO 7	0,2	0,102	0,008171282	3669	106,4	13021,2118	13,02	14,34	
	5		DÍAS	0,202	0,1	0,007853982	3613	121,1	15418,93089	15,42		
	6		(3/julio/2020)	0,2	0,102	0,008171282	3639	119,1	14575,43539	14,58		
	10		CURADO AL AIRE	ENSAYO 28	0,2	0,098	0,007542964	3474	109,8	14556,61204	14,56	14,58
	11			DÍAS	0,2	0,099	0,007697687	3511	107,7	13991,21508	13,99	
	12			(24/07/2020)	0,2	0,099	0,007697687	3411	117	15199,37014	15,20	

Anexo 18. Resultados de resistencia a compresión para concretos fabricados en Laboratorio. Fuente: Propia.

Tipo de concreto	Prueba	No.	Alt. 1 (mm)	Alt. 2 (mm)	Alt. 3 (mm)	Alt prom (mm)	Diam. 1 Arriba (mm)	Diam. 2 Arriba (mm)	Diam. 1 Abajo (mm)	Diam. 2 Abajo (mm)	Diam. Prom. (mm)	Masa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (Mpa)	Carga máxima (kN)	TIPO DE FALLA
CONCRETO CONVENCIONAL	Compresión 7 días (10/09/2020)	1	203,00	203,00	204,00	203,33	101,00	101,00	101,00	101,00	101,00	4,059	2492	13,23	105,96	5
		2	203,00	203,00	204,00	203,33	101,00	102,00	101,00	102,00	101,50	4,084	2482	13,51	109,32	5
		3	203,00	203,00	204,00	203,33	104,00	104,60	104,00	104,40	104,25	4,252	2450	13,23	112,98	5
	Compresión 28 días (1/10/2020)	4	204,45	203,28	203,60	203,78	99,80	100,64	100,01	100,45	100,23	4,048	2518	19,90	156,98	3
		5	203,30	202,83	202,77	202,97	100,09	100,47	99,99	100,46	100,25	4,039	2521	18,33	144,68	5
		6	203,35	204,28	203,44	203,69	99,67	101,35	101,06	100,40	100,62	4,058	2505	15,32	135,73	3
RCD 20%	Compresión 7 días (10/09/2020)	1	203	203	204	203,33	105	104	104	104	104,25	4,062	2340	12,68	108,21	5
		2	203	203	204	203,33	104,4	104	104	105	104,35	4,143	2382	12,83	109,73	interna
		3	203,5	203	204	203,50	101	101	101	102	101,25	3,098	1891	12,27	98,79	5
	Compresión 28 días (1/10/2020)	4	204,00	203,20	203,60	203,60	102,67	104,09	104,06	104,12	103,74	4,111	2389	17,54	148,26	5
		5	203,74	203,29	202,95	203,33	103,65	102,32	103,46	102,74	103,04	4,125	2433	18,55	154,66	3
		6	205,28	203,35	204,39	204,34	100,27	100,04	100,73	100,49	100,38	3,932	2431	18,81	148,89	3

Anexo 19. Rendimiento trituradora con material RCD cerámico en estado seco. Fuente: Propia.

# BULTOS	PESO (kg)	TIEMPO (s)	COMENTARIO
1	22,8	02:45	SECO
2	20,6	02:36	SECO
3	20,7	03:27	SECO
4	24,2	03:52	SECO
5	19,6	04:27	SECO
6	26,6	03:42	SECO
7	20,4	03:56	SECO
8	23,7	02:57	SECO
9	18,8	03:36	SECO
10	20,3	03:32	SECO
11	18	06:41	SECO
12	26,4	06:41	SECO
13	16,9	02:50	SECO
14	22	04:00	SECO
15	22,5	04:26	SECO
16	26,9	06:20	SECO
17	23,4	05:04	SECO
18	22,2	04:48	SECO
19	23,3	04:47	SECO
20	21,4	03:29	SECO
21	36	05:01	SECO
22	30	04:46	SECO
23	18,8	04:30	SECO
24	35,8	05:33	SECO
25	22,1	05:30	SECO
26	22,9	06:01	SECO
27	33,1	05:37	SECO
28	26,5	05:46	SECO
29	22,9	05:24	SECO
30	29,6	03:14	SECO
31	27,1	02:49	SECO
32	21,4	02:03	SECO
33	25,9	02:14	SECO
34	37	03:04	SECO
35	23,9	02:12	SECO
36	24,1	02:18	SECO
37	27,6	02:27	SECO

38	32	02:47	SECO
39	24,6	02:20	SECO
40	27,6	02:42	SECO
41	34,8	03:04	SECO
42	23,8	02:14	SECO
43	28,2	03:37	SECO
44	30,5	02:19	SECO
45	30,7	02:45	SECO
46	28,3	02:27	SECO
47	22,8	02:06	SECO
48	30,5	02:17	SECO
49	31,2	02:57	SECO
50	38	03:14	SECO
51	33,3	02:42	SECO
52	28,5	02:28	SECO
53	24,1	02:10	SECO
54	17,2	02:14	SECO
55	28,6	02:35	SECO
56	32,3	03:09	SECO
57	35,6	03:29	SECO
58	26	02:21	SECO
59	26,7	02:05	SECO
60	33,1	03:18	SECO
61	28,6	02:23	SECO
62	37,4	03:31	SECO
63	30,8	02:47	SECO
64	30,5	01:35	SECO
65	29,6	02:21	SECO
66	32,7	02:48	SECO
67	18,7	01:36	SECO
68	30	02:40	SECO
69	28	02:06	SECO
<b>PROMEDIO</b>	<b>26,67</b>	<b>03:25</b>	<b>SECO</b>

*Anexo 20. Rendimiento trituradora con material ARC cerámico en estado húmedo. Fuente: Propia.*

<b># BULTOS</b>	<b>PESO (kg)</b>	<b>TIEMPO (s)</b>	<b>COMENTARIO</b>
1	46,5	12:46	HÚMEDO
2	29,7	10:05	HÚMEDO
3	23	12:27	HÚMEDO
4	37,4	15:44	HÚMEDO
5	28,6	08:26	HÚMEDO
6	33,5	08:06	HÚMEDO
<b>PROMEDIO</b>	<b>33,1166667</b>	<b>11:16</b>	<b>HÚMEDO</b>