

Análisis Experimental De Las Propiedades Mecánicas Del Concreto De Alta Resistencia Fabricado Con Agregados Reciclados De Concreto.


Juan Sebastián Diosa Arenas

Nota de Aceptación 4,7

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



Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano
Director



Dr. Aníbal Cesar Maury Ramírez
Jurado



Dr. Iván Fernando Otálvaro Calle
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

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



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, Mayo 13 de 2020

Autor: Juan Sebastián Diosa Arenas

Título del Trabajo de Grado: “Análisis Experimental De Las Propiedades Mecánicas Del Concreto De Alta Resistencia Fabricado Con Agregados Reciclados De Concreto”

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.

Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano.

Autor

Nombre: Juan Sebastián Diosá Arenas

Dirección: Calle 13 # 38 – 62 Cali - Colombia

Teléfono de contacto: +57 316 758 38 28

Correo electrónico: jsdiosá@hotmail.com

Profesión: Ingeniero Civil

Universidad: Pontificia Universidad Javeriana Cali

Empresa: IDOM SAU

Cargo: Supervisor de Obras Civiles

Dedicatoria

A Dios, por darme vida y sabiduría para cumplir esta meta.

A mis padres Juan Pablo Diosa y Martha Arenas, por ser mi apoyo y refugio.

A Katherine Gómez, por su amor, apoyo y motivación.

A mi hermana Katheryn Diosa y abuela Luz Dary Castaño, por alentarme y aconsejarme.

Gracias familia, no lo hubiera logrado sin ustedes.

Agradecimientos

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por permitirme ser parte de su programa de posgrado y brindarme las instalaciones para cumplir este sueño.

Al Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano, por su apoyo, dedicación, paciencia, respeto, motivación, consejos, recomendaciones y conocimiento impartido durante el desarrollo de este proyecto, su apoyo fue fundamental.

A Juan Manuel Vélez, Nicolás Mayor y Alejandro Rojas, por su apoyo, colaboración y ayuda, fue muy valioso compartir con ustedes.

Al personal de laboratorio, en especial a Erlo Travi y el semillero de investigación en materiales de construcción MATCON, su aporte y colaboración fue invaluable.

A la casa comercial MAPEI, en especial a la Ing. Lauren Guisa, por su gestión y donación del aditivo superplastificante.

A CPA Construcciones Prefabricadas S.A., en especial al Arq. Luis Fernando, por su gestión y donación de los materiales constituyentes.

A la Universidad del Valle, por prestarme sus instalaciones, en especial al personal de laboratorio por su tiempo y colaboración para realizar los ensayos del módulo de elasticidad.

A mis compañeros de estudio por su apoyo, carisma y motivación, espero que esta amistad permanezca por siempre.

A todos muchas gracias, esta investigación no hubiera sido posible sin su ayuda.

Resumen

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estipuló que a partir del año 2018 entraba en vigencia la Resolución No. 0472 de 2017, que reglamenta la gestión integral de los residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición (RCD). Esta normativa fija las metas de aprovechamiento de los RCD en función del peso de los materiales utilizados en obra. En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del remplazo parcial del agregado grueso natural por Agregado Reciclado de Concreto (ARC), en las propiedades mecánicas del Concreto de Alta Resistencia (CAR). Para alcanzar los objetivos planeados, se desarrolló una metodología experimental compuesta por cinco etapas, que incluye: la selección de los Residuos de Concreto (RC) y posterior producción del ARC, la caracterización de los materiales utilizados, la fabricación de los concretos con diferentes contenidos de ARC (0, 10, 20 y 40%), la determinación de las propiedades en estado fresco y endurecido de dichos concretos y, finalmente, el análisis de los resultados. Se concluyó que los ARC cumplen con las especificaciones de la normativa colombiana para agregados y que es posible la fabricación de concretos de alta resistencia. Además, la incorporación del agregado reciclado tuvo un efecto positivo en las propiedades mecánicas y las relacionadas a durabilidad de los concretos, siendo que el remplazo parcial del 40% de ARC en relación al peso del agregado grueso, presentó el mejor desempeño. De esta manera, se viabiliza el uso de este residuo como material de construcción, lo que impacta positivamente al medio ambiente, al disminuir la explotación de los recursos naturales no renovables.

PALABRAS CLAVE: Agregados Reciclados de Concreto (ARC), Residuos de Concreto (RC), Concreto de Alta Resistencia (CAR), Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Abstract

In Colombia, the Ministry of Environment and Sustainable Development stipulated that as of 2018, Resolution No. 0472 of 2017 enters into force, which regulates the integral management of waste from construction and demolition activities (CDW). This regulation sets the goals for the use of CDW based on the weight of the materials used on construction job. In this context, this research aimed to evaluate the effect of partial replacement of natural coarse aggregate by Recycled Concrete Aggregate (RCA), on the mechanical properties of High Strength Concrete (HSC). To achieve the planned objectives, an experimental methodology was developed consisting of five stages, which included: the selection of Concrete Waste (CW) and subsequent production of the RCA, the characterization of the materials used, the manufacture of concrete with different contents RCA (0, 10, 20 and 40%), the determination of the properties in the fresh and hardened state of said concrete and, finally, the analysis of the results. It was concluded that the RCA meet with the specifications of the Colombian regulations for aggregates and that it is possible to manufacture high strength concrete. In addition, the addition of the recycled aggregate had a positive effect on the mechanical properties and those related to the durability of the concrete, with the partial replacement of 40% of RCA in relation to the weight of the coarse aggregate, the best performance obtained. In this way, the use of this waste as a construction material is made viable, which positively impacts the environment, by reducing the exploitation of non-renewable natural resources.

KEYWORDS: Recycled Concrete Aggregates (RCA), Concrete Waste (CW), High Strength Concrete (HSC), Construction and Demolition Waste (CDW).

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO DE
ALTA RESISTENCIA FABRICADO CON AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO.

Juan Sebastián Diosa Arenas
Ingeniero Civil

Director: Manuel Alejandro Rojas Manzano
Ingeniero Civil, Doctor en Estructuras y Construcción Civil.

Pontificia Universidad Javeriana, Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis Construcciones
Santiago de Cali; Valle del Cauca
Marzo de 2020

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Definición del Problema.....	4
1.1.1	Identificación del problema.....	4
1.1.2	Pregunta de investigación.....	5
1.1.3	Alcance.....	5
1.2	Objetivos.....	6
1.2.1	Objetivo general	6
1.2.2	Objetivos específicos.....	6
1.3	Organización del Documento Escrito.....	6
2	Revisión Bibliográfica	8
2.1	Residuos de Construcción y Demolición.....	8
2.1.1	Definición.....	8
2.1.2	Clasificación de Residuos de Construcción y Demolición	11
2.1.3	Clasificación del Agregado Reciclado de Concreto.....	15
2.1.4	Ensayos de caracterización de Residuos de Construcción y Demolición para agregados	21
2.2	Normatividad Colombiana para la gestión de Residuos de Construcción y Demolición	22
2.3	Efecto del Agregado Reciclado de Concreto en los Concretos de Alta Resistencia ..	30

3	Metodología.....	36
3.1	Programa Experimental.....	37
3.2	Producción del Agregado Reciclado de Concreto.....	38
3.3	Materiales Constituyentes.....	42
3.3.1	Cemento.....	43
3.3.2	Agregado fino.....	47
3.3.3	Agregado grueso.....	52
3.3.4	Agregado Reciclado de Concreto.....	57
3.3.5	Aditivo superplastificante.....	63
3.4	Métodos de Ensayo.....	64
3.4.1	Elaboración de concretos.....	64
3.4.2	Estado fresco (Slump).....	67
3.4.3	Estado endurecido.....	69
4	Diseño de Mezcla Según LA NORMA ACI 201.4.....	75
5	Análisis de Resultados.....	88
5.1	Resistencia a la Compresión.....	89
5.2	Resistencia a la Tracción Indirecta.....	93
5.3	Módulo de Elasticidad.....	97
5.4	Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	99

5.5	Absorción Total	101
5.6	Absorción Capilar.....	102
5.7	Análisis de Relación entre Parámetros	105
5.7.1	Resistencia a la Compresión vs Resistencia a la Tracción Indirecta.....	105
5.7.2	Resistencia a la Compresión vs Módulo de Elasticidad.....	106
5.7.3	Resistencia a la Compresión vs Velocidad de Pulso Ultrasónico	107
5.7.4	Resistencia a la Compresión vs Absorción Total.....	108
6	Conclusiones	110
6.1	Recomendaciones para trabajos futuros	111
7	Glosario de Términos Especiales.....	113
8	Bibliografía	114
9	Anexos	122

Lista de Tablas

Tabla 1. Panorama mundial de la generación de RCD. Fuente: (Armijos, 2019).....	10
Tabla 2. Lista europea de residuos (LER). Fuente: (Comisión Europea, 2014).....	12
Tabla 3. Clasificación de los Residuos de Construcción y Demolición. Fuente: (Secretaria Distrital de Ambiente, 2014).....	14
Tabla 4. Clasificación de residuos de construcción y demolición del agregado grueso en la Unión Europea. Fuente: (UNE-EN 933-11, 2010)	17
Tabla 5. Categorías de los agregados reciclados según composición del material en España. Fuente: (GEAR, 2011).....	19
Tabla 6. Requisitos de agregado reciclado para la preparación de concretos sin función estructural en Brasil. Fuente: (NBR 15116, 2004)	20
Tabla 7. Ensayos de caracterización de RCD. Fuente: (GEAR, 2011).....	21
Tabla 8. Requisitos para el aprovechamiento del RCD. Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017)	25
Tabla 9. Normatividades para la gestión y manejo de RCD y residuos generales en Colombia. Fuente: (Maat Soluciones Ambientales, 2019).....	26
Tabla 10. Propiedades mecánicas de los elementos de prueba cúbicos a los 28 días de curado. Fuente: (Etxeberria et al., 2007).	32
Tabla 11. Resistencia a la flexión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de las mezclas de concreto. Fuente: (González & Etxeberria, 2013).	32

Tabla 12. Reducción de la resistencia de los cubos de concreto después de 30 días de inmersión en H ₂ SO ₄ . Fuente: (Vinay Kumar et al., 2017).....	33
Tabla 13. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para las mezclas ARC-CC y ARC-CAR. Fuente: (Hamad & Dawi, 2017).....	35
Tabla 14. Matriz experimental de CAR con ARC. Fuente: Propia.....	37
Tabla 15. Matriz de ensayos para cada mezcla. Fuente: Propia.....	38
Tabla 16. Propiedades físicas y mecánicas del cemento. Fuente: Propia.	43
Tabla 17. Características físicas de la Arena media de río. Fuente: Propia.	47
Tabla 18. Características físicas del agregado grueso. Fuente: Propia.	52
Tabla 19. Características físicas del ARC. Fuente: Propia.	57
Tabla 20. Características del aditivo superplastificante. Fuente: Propia.....	63
Tabla 21. Secuencia de mezclado de los materiales a emplear en el proyecto. Fuente: (Lopes, 2011)	65
Tabla 22. Composición y parámetros de las mezclas de concreto. Fuente: Propia.	66
Tabla 23. Resultados asentamiento de las mezclas en estado fresco. Fuente: propia.....	68
Tabla 24. Datos básicos necesarios para realizar el diseño de mezcla. Fuente: Propia	75
Tabla 25. Asentamiento recomendado para concreto con y sin Aditivos Reductores de Agua de Alto Rango (HRWRA) Fuente: (ACI 211.4R-08, 2008).....	76
Tabla 26. Tamaño máximo sugerido de agregado grueso. Fuente: (ACI 211.4R-08, 2008). 76	

Tabla 27. Volumen recomendado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Fuente: (ACI 211.4R-08, 2008).....	77
Tabla 28. Primera estimación del requerimiento de agua de mezcla y contenido de aire del concreto recién mezclado basado en el uso de agregado fino con 35% vacíos. Fuente: (ACI 211.4R-08, 2008)	78
Tabla 29. Máxima relación a/c recomendada para Concretos de Alta Resistencia. Fuente: (ACI 211.4R-08, 2008)	79
Tabla 30. Dosificación inicial de la mezcla básica saturada superficialmente seca. Fuente: Propia.....	81
Tabla 31. Dosificación final de la mezcla básica de referencia saturada superficialmente seca. Fuente: Propia.....	83
Tabla 32. Humedades y absorción calculada en laboratorio. Fuente: Propia.	84
Tabla 33. Dosificación empleada para la mezcla de concreto por control de asentamiento. Fuente: Propia.....	85
Tabla 34. Resultados del concreto de corrección por asentamiento. Fuente: Propia.	86
Tabla 35. Mezclas de concreto de altas resistencias estudiadas. Fuente: Propia.	88
Tabla 36. Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión. Fuente: Propia.	89
Tabla 37. Resultados promedio de resistencia a compresión uniaxial de los concretos. Fuente: Propia.....	91
Tabla 38. Análisis de varianza de los resultados de resistencia a tracción. Fuente: Propia... ..	94

Tabla 39. Resultados promedio de resistencia a tracción indirecta de los concretos. Fuente: Propia.....	95
Tabla 40. Resultados promedio del módulo de elasticidad de los concretos. Fuente: Propia.....	97
Tabla 41. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los concretos. Fuente: Propia.....	99
Tabla 42. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los concretos. Fuente: (Neville, 1997).....	99
Tabla 43. Resultados promedio de la prueba de absorción por inmersión total de los concretos a 28 días. Fuente: Propia.....	101
Tabla 44. Resultados promedio de la prueba de absorción de agua por capilaridad en los cilindros de ensayo para las mezclas a 28 días de edad del concreto (g/cm ²). Fuente: Propia..	103
Tabla 45. Resultados promedio de la penetración de agua por absorción de los concretos. Fuente: Propia.....	104

Lista de Figuras

Figura 1. Generación de residuos por actividades económicas. Fuente: (Eurostat, 2016)	9
Figura 2. Comparación mensual de la producción de concreto premezclado según destinos (miles de metros cúbicos). Fuente: (DANE, 2020)	16
Figura 3. Producción anual de Concreto premezclado (miles de metros cúbicos y variación doce meses). Fuente: (DANE, 2020)	16
Figura 4. Reutilización del 2% anual según Resolución 0472 del 2017. Fuente: Propia.	25
Figura 5. Correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión. Fuente: (Amario et al., 2017).....	34
Figura 6. Metodología. Fuente: Propia.	36
Figura 7. (a) Especímenes de control del laboratorio (b) Selección de cilindros con resistencia entre 60-80 MPa (c) Cantidad de material a utilizar. Fuente: Propia.	39
Figura 8. (a) Trituradora de mandíbula (b) Mandíbula. Fuente: Propia.	39
Figura 9. (a) Prensa manual (b) Fragmentación de los cilindros. Fuente: Propia.....	40
Figura 10. (a) Proceso de trituración (b) Cantidad de ARC. Fuente: Propia.	41
Figura 11. (a) Tamiz #4 (b) ARC Tamizado. Fuente: Propia.	41
Figura 12. Equipo de cuarteo. Fuente: Propia.....	42
Figura 13. Aparato de Blaine, Ensayo de Finura cemento. Fuente: Propia.....	44
Figura 14. (a) Ensayo densidad del cemento (b) probeta de ensayo. Fuente: Propia.	44

Figura 15. (a) Preparación de mezcla (b) Molde de prueba (c) Ensayo para determinar la consistencia normal del cemento. Fuente: Propia.....	45
Figura 16. (a) Pasta de consistencia normal (b) Equipo de Vicat (c) Ensayo tiempo de fraguado cemento. Fuente: Propia.	46
Figura 17. (a) Elaboración cubos de 50mm (b) Curado de cubos (c) Ensayo resistencia a la compresión del cemento. Fuente: Propia.....	46
Figura 18. (a) Equipo de tamizado (b) Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos. Fuente: Propia.....	48
Figura 19. Granulometría agregado fino, limites NTC-32 (ASTM E 11). Fuente: Propia....	48
Figura 20. (a) Arena seca al aire para masas unitarias (b) Proceso de compactación. Fuente: Propia.....	49
Figura 21. (a) Ensayo de materia orgánica en arena fina (b) Rango del colorímetro después de 24 hrs. Fuente: Propia.	50
Figura 22. Ensayo gravedad específica y absorción en arena fina, matraz de ensayo. Fuente: Propia.....	51
Figura 23. (a) Inmersión agregado fino en sulfato de sodio (b) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. Fuente: Propia.....	52
Figura 24. (a) Equipo de tamizado (b) Tamices para ensayo de granulometría en agregados gruesos. Fuente: Propia.....	53
Figura 25. Granulometría agregado grueso, limites NTC 174 (Quinta actualización). Fuente: Propia.....	53

Figura 26. Máquina de los ángeles utilizada para el desgaste en agregados gruesos. Fuente: Propia.....	54
Figura 27. (a) Molde de muestra (b) Ensayo de masa unitaria en condición compacta para agregados gruesos. Fuente: Propia.....	55
Figura 28. Agregado grueso sumergido para ensayo de densidad específica y absorción. Fuente: Propia.....	56
Figura 29. (a) Inmersión agregado grueso en sulfato de sodio (b) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. Fuente: Propia.	56
Figura 30. Tamices utilizados para ensayo de granulometría en ARC. Fuente: Propia.	58
Figura 31. Granulometría ARC 1er trituración, límites NTC-174. Fuente: Propia.	58
Figura 32. Granulometría ARC 2da Trituración, límites NTC-174. Fuente: Propia.	59
Figura 33. Comparación granulometría ARC Vs Grava, límites NTC-174. Fuente: Propia.	60
Figura 34. Máquina de los ángeles utilizada para el desgaste en ARC. Fuente: Propia.....	60
Figura 35. (a) Molde de muestra (b) Ensayo de masa unitaria en condición suelta para agregados reciclados. Fuente: Propia.....	61
Figura 36. ARC sumergido para ensayo de peso específico y absorción. Fuente: Propia.....	62
Figura 37. (a) Inmersión ARC en sulfato de sodio (b) y (c) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. Fuente: Propia.....	62
Figura 38. (a) Muestra de arena de sílice seca (b) Muestra de arena de sílice seca + aditivo (c) Estado de la arena de sílice mezclada con aditivo y secado en horno. Fuente: Propia.....	64

Figura 39. (a) y (b) Materiales constituyentes para las mezclas. (c) Mezcladora y equipos. (d) Elaboración de las mezclas. Fuente: Propia.....	65
Figura 40. (a) Elaboración de los cilindros de prueba. (b) Curado de los especímenes de ensayo para las mezclas de concreto. Fuente: Propia.	67
Figura 41. (a) y (b) Procedimiento empleado, utilizando el cono de Abrams. (c) Asentamiento CB. (d) Asentamiento RC10. (e) Asentamiento RC20. (f) Asentamiento RC40. Fuente: Propia.	68
Figura 42. (a) Ensayo resistencia a la compresión. (b) Falla a compresión CAR. Fuente: Propia.	70
Figura 43. (a) Ensayo resistencia a la tracción. (b) Falla a tracción CAR. Fuente: Propia....	71
Figura 44. (a) Ensayo módulo de elasticidad. (b) Preparación espécimen de prueba. Fuente: Propia.	72
Figura 45. Ensayo velocidad de pulso ultrasónico. Fuente: Propia.	72
Figura 46. Ensayo absorción total (a) Masa seca en horno. (b) Masa saturada después de inmersión. (c) Masa saturada después de hervida. (d) Masa sumergida. Fuente: Propia.	73
Figura 47. (a) Ensayo absorción capilar. (b) Ascensión capilar. Fuente: Propia.	74
Figura 48. Relación de mezclas de agregado fino y grueso para la dosificación obtenida. Fuente: Propia.	82
Figura 49. (a) y (b) Preparación de la mezcla de concreto, corrección por asentamiento. Fuente: Propia.	85

Figura 50. (a) y (b) Asentamiento de la mezcla de concreto con aditivo superplastificante. Fuente: Propia.....	86
Figura 51. (a) Elaboración de los cilindros de prueba. (b) Curado de los especímenes de ensayo para el concreto de control por asentamiento. Fuente: Propia.....	86
Figura 52. Supuesto de normalidad de los resultados de resistencia a compresión. Fuente: Propia.....	90
Figura 53. Supuesto de igualdad de varianza de los resultados de resistencia a compresión. Fuente: Propia.....	90
Figura 54. Supuesto de igualdad de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 7 días de edad. Fuente: Propia.....	92
Figura 55. Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos. Fuente: Propia.....	93
Figura 56. Supuesto de normalidad de los resultados de resistencia a tracción. Fuente: Propia.	94
Figura 57. Supuesto de igualdad de varianza de los resultados de resistencia a tracción. Fuente: Propia.....	95
Figura 58. Evolución de la resistencia a tracción indirecta de los concretos. Fuente: Propia.	96
Figura 59. Evolución del módulo de elasticidad de los concretos. Fuente: Propia.....	98
Figura 60. Evolución de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros de ensayo para las dos edades de estudio. Fuente: Propia.	100

Figura 61. Absorción por inmersión total de los concretos a la edad de 28 días. Fuente: Propia.	102
Figura 62. Evolución de la absorción promedio de agua por capilaridad en los concretos. Fuente: Propia.....	104
Figura 63. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y a tracción indirecta (f_t). Fuente: Propia.....	106
Figura 64. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y el módulo de elasticidad (ME). Fuente: Propia.....	107
Figura 65. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Fuente: Propia.....	108
Figura 66. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y la absorción total por inmersión (A_{ti}). Fuente: Propia.....	109

1 INTRODUCCIÓN

La producción de residuos de construcción y demolición (RCD) ha aumentado de manera significativa en todo el mundo. De acuerdo con Arenas (2007), el sector de la construcción es responsable del 40% de la energía consumida, del 50% de los recursos naturales empleados y del 50% de los residuos generados a nivel mundial. Esto se debe en primera instancia al desarrollo constante en el sector de la construcción potenciado por el crecimiento demográfico, según la Cámara Colombiana de la Construcción - CAMACOL (2016), entre 2016 y 2020 a nivel nacional se prevé un aumento de la población del 1,3%, mientras que los hogares crecerán a tasas del orden del 2,2% anual. Lo cual explica el desarrollo de nuevas construcciones y la necesidad de incorporar metodologías innovadoras para el aprovechamiento de RCD.

Según el Diagnóstico Integral del Modelo Actual de la Gestión de Residuos en Colombia, se ha incrementado la generación de RCD, en el año 2011 se produjeron en las ciudades de Bogotá, Medellín, Santiago de Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés, un total de 22,3 Mt de RCD, equivalentes a 15.027.890 m³ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). En el sur de Colombia, concretamente en la ciudad de Santiago de Cali, se producen cerca de 2.480 m³ de residuos por día, cifra que en un año alcanza un millón de metros cúbicos (Robayo, Matthey, Silva, Burgos, & Arjona, 2015).

En países como Colombia, México y Argentina la gestión y el manejo de los RCD ya están reglamentados, sin embargo, no se está cumpliendo con los requerimientos exigidos por la ley, perjudicando el entorno y aumentando la cantidad de escombreras ilegales (Suárez-Silgado, Molina, Mahecha, & Calderón, 2018). No obstante, de acuerdo al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), desde el año 2018 tomó vigencia la Resolución No 0472 del 2017 que establece las disposiciones para la gestión integral de los RCD y aplica a todas las personas

naturales y jurídicas que generen, recolecten, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan residuos de las obras civiles o de otras actividades conexas en el territorio nacional. El principal reto de esta resolución para los constructores es que obliga a los grandes generadores a utilizar RCD aprovechables en un porcentaje del 6% en peso del total de los materiales usados en la obra este año 2020.

En concordancia con lo anteriormente expuesto, en los últimos años se han estudiado diferentes estrategias para el aprovechamiento de los RCD, una de ellas es la sustitución de los agregados naturales por los reciclados en las mezclas de concretos convencionales. Algunos investigadores han informado que el uso de agregados reciclados de concreto (ARC) afecta las propiedades del concreto, mientras que otros han producido con éxito concretos utilizando este tipo de residuos, arrojando desempeños que coinciden con el concreto convencional (Verian, Ashraf, & Cao, 2018). Según lo determinado por Laneyrie *et al.* (2016), los concretos incorporando ARC tuvieron un desempeño ligeramente menor que los concretos convencionales de referencia.

Este trabajo se encuadra dentro de una línea de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali que trata sobre el aprovechamiento de los RCD. Se destacan investigaciones como la Caracterización de la generación de RCD en sistemas industrializados para viviendas de interés social, en la ciudad de Santiago de Cali (Armijos, 2019), la Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto fabricado con agregados reciclados provenientes de adoquines (Bravo German & Bravo Gómez, 2018), el Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento portland (Caicedo Quinayás, 2016), el Estudio del uso de agregados reciclados de RCD provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto (Caicedo Campo & Perez Henao, 2014) y la

Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclados procedentes de RCD de la ciudad de Cali para uso en obras viales de bajo tránsito (Mena Sanclemente & Valdés Castro, 2014).

Ahora bien, el concreto de alta resistencia (CAR) es un material que posee considerables beneficios que causan un menor impacto al medio ambiente, debido a diferentes ventajas como: disminuir las secciones de elementos estructurales, creación de estructuras más esbeltas y de mayores luces, uso de adiciones minerales provenientes de residuos de otras industrias y mayor durabilidad de las edificaciones debido a su menor porosidad y permeabilidad.

El uso de ARC en este tipo de concretos puede ser una alternativa viable, ya que ayudaría a minimizar los impactos ambientales en pro de la preservación de los recursos naturales no renovables, pues disminuiría su explotación, reduciría los impactos negativos de los RCD y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. De esta manera, se produciría un concreto sostenible y amigable con el medio ambiente.

En este escenario, toma importancia este proyecto pues tiene como fin fabricar concretos de alta resistencia (CAR) con la incorporación de agregados reciclados de concreto (ARC) como reemplazo parcial de los agregados naturales, así como, estudiar su efecto en las propiedades mecánicas, con el objetivo de proponer mejoras en el aprovechamiento y valorización de los RCD. Además, cabe destacar que es un estudio innovador a nivel nacional, ya que no se encontraron investigaciones que traten sobre el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de concreto de alta resistencia para la fabricación de CAR.

1.1 Definición del Problema

1.1.1 Identificación del problema

Teniendo en cuenta las metas de aprovechamiento de RCD del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia, plasmadas en la Resolución No. 0472 del año 2017, es necesario adoptar disposiciones dirigidas al fortalecimiento de la gestión integral de estos residuos. Se estipula que los grandes generadores deberán utilizar RCD aprovechables en un porcentaje no inferior al 2% en peso del total de los materiales usados en la obra a partir del año 2018, en los años posteriores se deberán garantizar un incremento anual de dos puntos porcentuales, hasta alcanzar como mínimo un 30% de RCD aprovechable en peso del total de los materiales usados en la obra (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2019 la producción de concreto premezclado alcanzó los 7.246,0 miles de metros cúbicos, lo que representó un incremento del 3,0% comparado con el 2018 (DANE, 2019). Lo anterior, muestra la importancia del sector para la industria de la construcción, pero también crea grandes desafíos en áreas como la gestión ambiental y la sostenibilidad, especialmente, por la generación potencial de residuos.

Teniendo en cuenta que los agregados representan aproximadamente el 70% del volumen total del concreto (Amario, Rangel, Pepe, & Toledo Filho, 2017), es de vital importancia la creación de soluciones innovadoras y sostenibles con sustento investigativo, como el presente trabajo de grado, que busca reducir la explotación de los recursos naturales no renovables por medio de la disminución del uso de agregados naturales, a través de la fabricación de concretos de alta resistencia con ARC. Lo anterior, es un avance para la viabilidad técnica del uso de estos materiales y permite aportar al cumplimiento de las metas establecidas por la legislación colombiana

(Resolución No 0472 del 2017), disminuyendo el impacto ambiental generado por la construcción, además de los posibles beneficios económicos en el aprovechamiento de los residuos y la necesidad de reincorporarlos en el ciclo constructivo, lo que generaría un valor agregado para la ejecución del proyecto.

1.1.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es el efecto del reemplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado de concreto, en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia?

1.1.3 Alcance

Esta investigación es experimental y tiene como alcance determinar la viabilidad del uso de los agregados reciclados de concreto, producidos de los especímenes ensayados del Laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para fabricar concretos de alta resistencia. Es importante aclarar que este estudio se realizó con un agregado reciclado ideal, dado que se fabricó directamente los residuos que no estaban contaminados de los cilindros de concreto de alta resistencia ensayados en el laboratorio, lo cual facilitó su clasificación, selección y producción.

Los resultados obtenidos son aplicables a los materiales utilizados, que fueron los disponibles en la ciudad de Cali para la fabricación de concretos y morteros. Fue analizada una clase de resistencia de concreto. Así mismo, la sustitución de los agregados gruesos naturales se realizó en masa con remplazos parciales del 10, 20 y 40% de ARC. Para la dosificación de mezcla se utilizó la metodología del ACI 211.4R (2008). Finalmente, se estudió el efecto de los residuos en las propiedades del concreto en estado fresco y especialmente, las propiedades mecánicas, así como algunas asociadas a durabilidad. La implementación de estos resultados dependerá de la ejecución

de más investigaciones que evalúen el impacto de este tipo de residuos en las diferentes propiedades del CAR.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del remplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado de concreto, en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Producir y caracterizar el agregado grueso reciclado proveniente de residuos de concretos de alta resistencia.
- Determinar las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia con reemplazos parciales del agregado grueso natural por agregado reciclado de concreto.
- Analizar la viabilidad del empleo parcial de agregado reciclado de concreto en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia.

1.3 Organización del Documento Escrito

En el Capítulo 1, se presenta la problemática de la generación de RCD en el ámbito mundial, nacional y local. Se muestran los requerimientos establecidos mediante normativas del orden Nacional y se plantea la inclusión del ARC en Concretos de Alta Resistencia como una alternativa para mitigar los efectos del impacto ambiental del sector de la Construcción.

En el Capítulo 2, se realiza la revisión bibliográfica relacionada a la generación y clasificación de los RCD mediante normativas internacionales y nacionales, además de un panorama mundial de la clasificación de los ARC. También se presentan los lineamientos, metodologías y normas a

nivel nacional para el manejo de Residuos en Colombia y se incluyen investigaciones que analizan el efecto del ARC en los Concretos de Alta Resistencia.

En el Capítulo 3, se explica la metodología empleada para el desarrollo de la investigación, describiendo los procesos y lineamientos aplicados para el cumplimiento de los objetivos trazados. Esta metodología podrá ser tenida en cuenta en proyectos futuros, con el fin de promover el uso de ARC para la fabricación de CAR u otra clase de concretos.

En el Capítulo 4, se realiza el diseño de la mezcla de CAR según las recomendaciones del ACI 211.4R (2008). La cual es la guía para seleccionar proporciones para concreto de alta resistencia utilizando cemento Portland y otros materiales cementantes.

En el Capítulo 5, se exponen los resultados obtenidos en la investigación y se realiza un análisis para evaluar el efecto del remplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado, en las propiedades mecánicas del concreto, tales como la resistencia a compresión, la resistencia a tracción indirecta, el módulo de elasticidad y la velocidad de pulso ultrasónico. De igual manera, se evaluaron las propiedades asociadas a la durabilidad, como absorción total y capilar. Por último, se presenta el análisis de relación entre parámetros de cada propiedad.

En el Capítulo 6, Se muestran las conclusiones de la elaboración del proyecto y se plantean recomendaciones para el complemento de trabajos futuros.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo fue estructurado en tres temáticas principales. La primera aborda información relevante sobre los RCD, como definiciones, clasificación y su posible aprovechamiento como agregados. Posteriormente, se realizó una revisión de la normatividad aplicable a la gestión de los residuos en Colombia. La última temática aborda fue la revisión de investigaciones sobre la incorporación del agregado reciclado en CAR.

2.1 Residuos de Construcción y Demolición

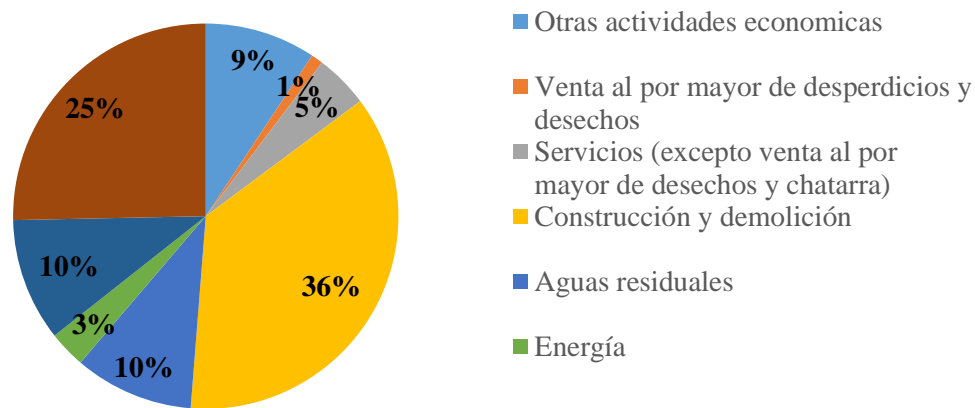
2.1.1 Definición

En Colombia, Según el Decreto 1713 de 2002, por medio del cual se reglamenta la gestión integral de residuos sólidos (RS), los RCD pueden ser definidos como todo residuo sólido sobrante de las actividades de la construcción, reparación o demolición de obras civiles o de otras actividades conexas, complementarias o análogas (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002).

En la Figura 1, se presenta la generación de RS de las diferentes industrias de la Unión Europea, donde la construcción se destaca como la actividad que mayores residuos genera. Cabe anotar que la cantidad producida de RS en el año 2016, fue de aproximadamente 2.503 Mton, donde los RCD representan un 36% (Eurostat, 2016).

Teniendo en cuenta que la industria de la construcción es el mayor generador de residuos, es importante analizar la generación y aprovechamiento en diferentes países. En la Tabla 1, se detalla el panorama mundial de la generación de RCD, así como la capacidad de gestión y aprovechamiento de estos.

Figura 1. Generación de residuos por actividades económicas. **Fuente:** (Eurostat, 2016)



En Colombia, se observa que la cantidad total producida de RCD es de 22 Mton, del cual no se registra ningún indicador de aprovechamiento. Según Alcalde & López, (2015), la generación de RCD en Santiago de Cali ha sido de 500.246 ton en el año 2016. Esto se debe al crecimiento potencial de la ciudad, de ahí la necesidad que se analice y aproveche los RCD, por medio de herramientas que permitan mitigar el impacto ambiental con la inclusión parcial de residuos como agregados.

Los residuos aprovechables en la industria de la construcción, pueden ser reutilizados en procesos constructivos de diferentes tipos de estructuras, como: edificaciones y vías, inclusión parcial de agregados reciclados, rellenos o terraplenes, estructura de pavimentos (bases y sub-bases), adicionalmente en elementos prefabricados (andenes, losas de paso peatonal, adoquines y elementos de mampostería), también podrían ser empleados para concretos no estructurales (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).

Tabla 1. Panorama mundial de la generación de RCD. **Fuente:** (Armijos, 2019)

Países	Total de RCD Mton	Total de RCD Aprovechado Mton	Total de RCD Aprovechado%
OCEANÍA			
Australia	19,3	12	62
ASIA			
China	1.020,0	120	40
Hong Kong	24,3	6,8	28
Japón	77	62	81
Taiwán	63	58,2	91
Tailandia	10	3,2	32
EUROPA			
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	2	28
Reino Unido	114,2	74,2	65
AMERICA			
Estados Unidos	534	256,3	48
Canadá	9	3	30
México ^a	10	4	35
Brasil ^b	101	6,2	6
Colombia ^c	22		
AFRICA			
Sur África	4,7	0,8	n.a

^a México, Total de RCD generado. Fuente: (CMIC, 2014).

^b Brasil, Total de RCD generado. Fuente: (Buss, Saccol, & Bastianello, 2012).

^c Colombia, Total de RCD generado. Fuente: (Instituto de estudios ambientales & Universidad Nacional de Colombia, 2017)

Dado que los RCD constituyen entre el 36 y 40 % de la producción total de desechos sólidos en el mundo (Eurostat, 2016; Rao, Jha, & Misra, 2007), el uso del ARC en la industria de la construcción, tiene efectos positivos ambientales como: la disminución de la explotación de recursos naturales no renovables, la menor producción de gases de efecto invernadero y la disminución de la disposición final de los desechos. Finalmente, al reincorporar los RCD al ciclo constructivo, se promueve la economía circular, lo que conlleva beneficios económicos, al darle un valor agregado a los residuos y al promover el cumplimiento de las normativas vigentes ambientales en cada región.

2.1.2 Clasificación de Residuos de Construcción y Demolición

Fatta et al. (2003), clasifican los RCD según la fuente de la cual provienen, específicamente en la etapa constructiva que lo generó, es decir que la etapa inicial de excavación genera residuos diferentes a la etapa de mampostería u acabados, dado que la composición del residuo variará conforme a la fase en la cual se encuentre el proyecto de construcción.

A continuación, se presentan diversas metodologías para la clasificación de RCD en países como Europa, Brasil y Colombia. Estos lineamientos se rigen por la normatividad ambiental especial, establecida en cada país.

2.1.2.1 Europa

Las normativas europeas determinan el listado de componentes de los RCD para una adecuada gestión de los mismos. Lo anterior, se puede observar en la Tabla 2 que describe la clasificación de los RCD en 9 grupos.

Tabla 2. Lista europea de residuos (LER). **Fuente:** (Comisión Europea, 2014)

17	Residuos de la Construcción y Demolición [incluida la tierra incluida excavaciones]
<i>1701</i>	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
170101	Hormigón.
170102	Ladrillos.
170103	Tejas y materiales cerámicos.
<i>1702</i>	Madera, vidrio y plástico.
170201	Madera.
170202	Vidrio.
170203	Plástico.
<i>1703</i>	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
<i>1704</i>	Metales [incluidas sus aleaciones].
170401	Cobre, bronce, latón.
170402	Aluminio.
170403	Plomo.
170404	Zinc.
170405	Hierro y acero.
170406	Estaño.
170407	Metales mezclados.
<i>1705</i>	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
<i>1706</i>	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
<i>1708</i>	Materiales de construcción a partir de yeso.
170801	Materiales de construcción a base de yeso contaminados con sustancias peligrosas.
170802	Materiales de construcción a partir de yeso distintos de los especificados en el código 170801.
<i>1709</i>	Otros residuos de construcción y demolición.
170903	Otros residuos de construcción y demolición [incluidos los residuos mezclados] que contienen sustancias peligrosas.

2.1.2.2 Brasil

Según Consejo Nacional del Medio Ambiente (2002), sobre la cual se implementó la resolución CONAMA 307 en el país de Brasil, la clasificación de residuos se realiza por medio de 4 clases:

Clase A: Son los residuos reutilizables o reciclables como agregados, tales como:

- Residuos de construcción provenientes de demolición, reformas y reparación de pavimentos o de otras obras de infraestructura, inclusive suelos provenientes de terraplenes.

- Residuos de construcción provenientes de demolición, reformas y reparación de edificaciones: morteros y componentes cerámicos (ladrillos, bloques tejas, placas de revestimiento y otros).
- Residuos de construcción provenientes de demolición, remodelación y reparación de piezas remoldadas en concreto (bloques, tubos, y otros productos no contenidos en obra).

Clase B: Son los residuos reciclables para otras destinaciones como: plásticos, papel, metales vidrios maderas y otros.

Clase C: Son los residuos para los que se han desarrollado tecnologías, o sus aplicaciones no son económicamente viable para su reciclaje o su reutilización, tales como el yeso.

Clase D: Son los residuos peligrosos resultantes del proceso de construcción como (tintas, solventes, aceites u otros) o iguales contaminados de demoliciones, reformas o reparos (clínicas radiológicas, instalaciones industriales y otros) (Como se cita en Armijos, 2019)

2.1.2.3 Colombia

De acuerdo con la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establecida en el orden nacional y vigente desde enero de 2018, clasifica los RCD en:

- 1) Residuos de Construcción y demolición susceptibles de aprovechamiento:
 - 1.1) Productos de excavación y sobrantes de la adecuación del terreno: Coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.
 - 1.2) Productos de cimentaciones y pilotajes: Arcillas, bentonitas y demás, tales como:
 - 1.3) Pétreos: Concreto, arena, gravas, gravilla, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas y sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.

- 1.4) No pétreos: Vidrios, metales como acero, hierro, cobre, aluminio con o sin recubrimiento de zinc o estaño, plásticos tales como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas y cauchos compuestos de madera y cartón-yeso, entre otros.
- 2) Residuos de Construcción y demolición no susceptibles de aprovechamiento:
- 2.1) Los contaminados con residuos peligrosos.
- 2.2) Los que por su estado no pueden ser procesados.
- 2.3) Los que tengan características de peligrosidad, estos se regirán por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión. De acuerdo al Decreto 4741 estipulado por el Ministerio de Ambiente (2005).

Para la gestión de residuos de construcción, la Secretaria Distrital de Ambiente (2014) de la Alcaldía Mayor de Bogotá, estableció la guía para la elaboración del plan de gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición en obra, donde los clasifica como: RCDs aprovechables, no aprovechables y otros, ver Tabla 3 (Como se cita en Armijos, 2019).

Tabla 3. Clasificación de los Residuos de Construcción y Demolición. **Fuente:** (Secretaria Distrital de Ambiente, 2014)

Categoría	Grupo	Clase	Componentes	
RCD aprovechables	I. Residuos mezclados	Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales no pasantes al tamiz # 200.	
	II. Residuos de material fino	Residuos finos no expansivos	Arcilla, limos y residuos inertes que sobrepasen el tamiz # 200	
		Residuos finos expansivos	Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200	
	III. Otros residuos		Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, papel, siliconas, vidrios, y cauchos
			Residuos metálicos	Acero, hierro, cobre y aluminio
			Residuos orgánicos	Residuos de tierra negra
			Residuos orgánicos vegetales	Residuos vegetales y otras especies bióticas

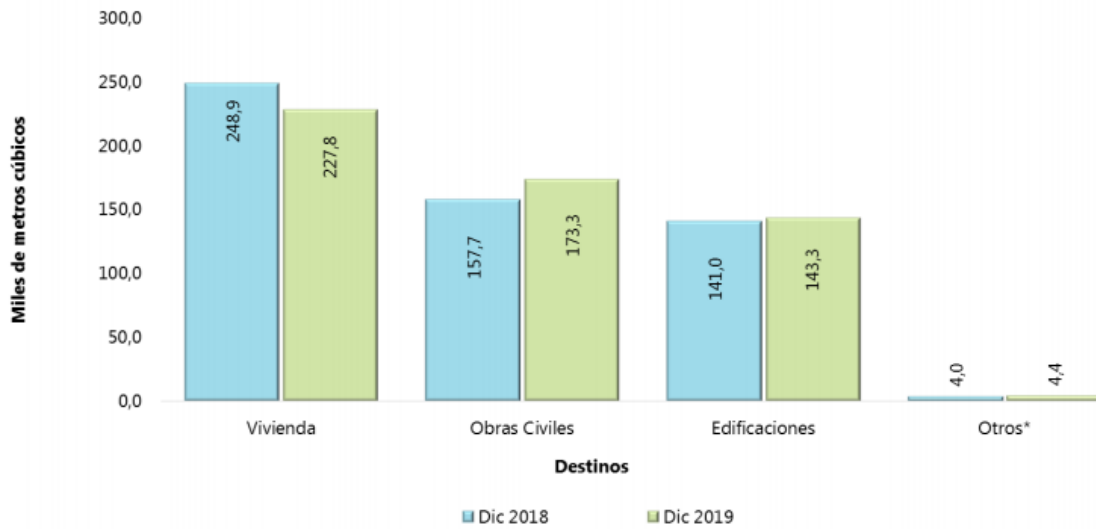
Categoría	Grupo	Clase	Componentes
RCD No Aprovechables	IV. Residuos peligrosos	Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos, explosivos, tóxicos y patógenos	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, resinas, plastificantes, tintas, y betunes
	V. Residuos especiales	No definida	Poliestireno, icopor, cartón, yeso (drywall).
	VI. Residuos contaminados con otros residuos	Residuos contaminados con residuos peligrosos	Materiales pertenecientes a los grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos.
		No definida	Residuos contaminados con otros residuos que hayan perdido las características propias de su aprovechamiento.
Otros	VII. Otros residuos	No definida	Residuos que por requisitos técnicos no es permitido su reúso en obras.

2.1.3 Clasificación del Agregado Reciclado de Concreto

Por ser el concreto uno de los insumos más importantes para el sector de la construcción, tanto para la mayoría de las obras civiles que se realizan en el país (carreteras, puentes, represas, etc.), como también para la construcción de edificaciones en sus primeras etapas constructivas; la producción de concreto se constituye como un potencial indicador líder del sector (DANE, 2020).

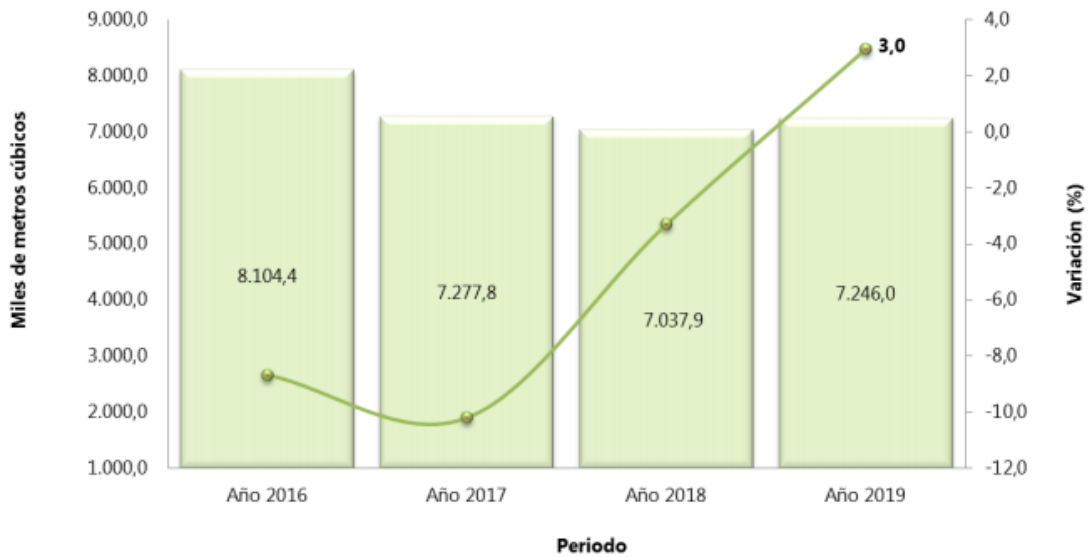
En la Figura 2 se puede observar la producción nacional de concreto premezclado en el mes de diciembre para los años de 2018 y 2019 según su destino en miles de metros cúbicos.

Figura 2. Comparación mensual de la producción de concreto premezclado según destinos (miles de metros cúbicos). **Fuente:** (DANE, 2020)



En la Figura 3 se muestra la producción total anual de Concreto Premezclado en miles de metros cúbicos y su variación en los años 2016 a 2019.

Figura 3. Producción anual de Concreto premezclado (miles de metros cúbicos y variación doce meses). **Fuente:** (DANE, 2020)



Como se observa en la Figura 3, en el año 2019 la producción de concreto premezclado alcanzó los 7.246,0 miles de metros cúbicos, con una variación de 3,0% en comparación con lo registrado en el año 2018, periodo en el que se produjeron 7.037,9 miles de metros cúbicos (DANE, 2020).

Debido a la alta producción de concreto y el bajo aprovechamiento en los Residuos de Construcción y Demolición en Colombia, es necesario implementar medidas para la caracterización, producción y uso de Agregado Reciclado del Concreto. En el panorama mundial existen diversas normativas o lineamientos para la clasificación del ARC, en las cuales se destacan la norma Europea UNE-EN 933-11 de 2010, la normativa Española mediante la GEAR 2011 y la normativa Brasileña mediante la NBR 15116 de 2004.

2.1.3.1 Europa

La Norma Europea UNE-EN 933-11 (2010) tiene como objetivo determinar las propiedades geométricas de los áridos y la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de residuos de construcción y demolición del agregado grueso en la Unión Europea. **Fuente:** (UNE-EN 933-11, 2010)

Constituyente	Descripción
Rc	Concreto, productos de concreto, mortero y ladrillos de concreto.
Ru	Piedra natural, agregado reciclado limpio (sin mortero).
Rb	Ladrillos de cerámica, tejas, fachaletas, cerámicos, otros productos de construcción que no flotan.
Ra	Materia bituminosa.
Rg	Vidrio.
FLs	Agregados flotantes (<1mg/m3).
FLns	Material flotante, no agregados (<1mg/m3).
X	Otros: Materia cohesivo (suelo y arcillas), metales, no flotantes (madera), plástico y caucho.

2.1.3.2 España

La Guía Española de Agregados Reciclados (GEAR, 2011) define estos agregados como un producto reciclado producido en los centros de valorización y que cumple con los requisitos técnicos para una aplicación determinada. La clasificación en base a la composición está formada por cuatro tipos o categorías de agregados reciclados:

- I. Categoría ARH - Agregados Reciclados de Hormigón: el contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es del 90% o más en peso. Se suma el contenido de hormigón al de piedra natural, por considerar que tienen un comportamiento asimilable.
- II. Categoría ARMh - Agregados Reciclados Mixtos de Hormigón: el contenido de hormigón y piedra es menor al 90% y el de material cerámico no alcanza el 30%.
- III. Categoría ARMc - Agregados Reciclados Mixtos Cerámicos: El contenido de material cerámico supera el 30%.
- IV. Categoría ARC - Agregados Reciclados Cerámicos: El contenido de material cerámico supera el 70%.
- V. Categoría ARMa - Agregados Reciclados Mixtos con Asfalto: Esta clasificación debe completarse con la determinación del contenido de los otros dos tipos de fracciones en la mezcla (asfalto y materia inorgánica), dado que su exceso determina la pérdida de la consideración del residuo como agregado reciclado:
 - Asfalto - Agregados Reciclados con Asfalto: cuando el árido reciclado contiene entre un 5% y un 30% de materiales bituminosos.
 - Mezclas bituminosas (MB): materiales inorgánicos previamente utilizados en la construcción con un contenido de mezclas bituminosas superior al 30% en peso.

- Materia inerte (MI): se considera que con más de un 1% en peso de “impropios” (plástico, madera, vidrio entre otro), no puede definirse como agregado reciclado.

En la Tabla 5 se detallan las categorías de los agregados reciclados según los grupos descritos anteriormente.

Tabla 5. Categorías de los agregados reciclados según composición del material en España. **Fuente:** (GEAR, 2011).

Nomenclatura	Nombre	Características
ARH	Agregados Reciclados de Hormigón	Piedra Natural y Hormigón > 90%
		C < 10% A < 5% X < 1%
ARMh	Agregados Reciclados Mixtos de Hormigón	Piedra Natural y Hormigón > 70%
		C < 30% A < 5% X < 1%
ARC	Agregados Reciclados de Cerámicos	Piedra Natural y Hormigón < 30% C < 30%
ARMc	Agregados Reciclados Mixtos de Cerámicos	A < 5% X < 1%
		C > 70% A < 5% X < 1%
ARC	Agregados Reciclados de Cerámicos	Piedra Natural y Hormigón < 70%
ARMc	Agregados Reciclados Mixtos de Cerámicos	A < 5% X < 1%
		C > 70% A < 5% X < 1%
ARMa	Agregados Reciclados mixto con asfalto	5% < A < 30% X < 1%

*C: Material cerámico

*A: Asfalto

* X: Representa el contenido de materia inerte compuesto por plástico, madera, vidrio entre otros

2.1.3.3 Brasil

La norma brasilera que especifica los agregados reciclados de RCD es la NBR 15116 (2004), que estipula la posibilidad de utilizar este tipo de agregados (gruesos y finos) solamente en elementos de concreto no estructural. Lo anterior, es factible siempre y cuando los agregados provengan de residuos Clase A, de esa forma se obtienen Agregado de Residuo de Concreto y Agregado de Residuo Mixto. Los materiales deben cumplir con los requisitos de la Tabla 6.

Tabla 6. Requisitos de agregado reciclado para la preparación de concretos sin función estructural en Brasil. **Fuente:** (NBR 15116, 2004)

Propiedades	Agregado reciclado clase A				Normas de ensayos	
	ARC		ARM		Agregado Grueso	Agregado Fino
	Grueso	Fino	Grueso	Fino		
Contenido de fragmentos a base de cemento y rocas (%)	≥ 90	-	< 90	-	Anexo A	-
Absorción de agua (%)	≤ 7%	≤ 12%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes -	Cloruros		1		ABNT NBR 9917	
	Sulfatos		1		ABNT NBR 9917	
Contenidos máximos en relación de la masa de agregado reciclado	Materiales no minerales ^A		2		Anexo A	Anexo B
	Torones de arcilla		2		ABNT NBR 7218	
Contenido total máximo de contaminantes			3			-
Contenido de material pasante del tamiz 75µm (%)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	

^A Para efectos de esta norma, son ejemplos de materiales no minerales: madera, plástico, bitumen, materiales carbonizados, vidrios y cerámicos.

2.1.4 Ensayos de caracterización de Residuos de Construcción y Demolición para agregados

La GEAR (2011) mediante la ejecución de proyectos experimentales, ha establecido la caracterización de los RCD por medio ensayos que evalúan propiedades físicas y químicas, con el objetivo de viabilizar su uso como materia prima para la fabricación de agregados (Tabla 7).

Tabla 7. Ensayos de caracterización de RCD. **Fuente:** (GEAR, 2011)

Propiedades	Ensayos	Norma Europea	Norma AASHTO	Norma ASTM
Propiedades Físicas	Granulometría	UNE-EN 933-1 2012	AASHTO T-27	ASTM C 136
	Forma	UNE-EN 933-3 / BS-812	AASHTO C-142	ASTM C 1260
	Composición	GEAR 2011	NA	NA
	Absorción - densidad	UNE-EN 1097-6 2001	AASHTO T-84 /85	ASTM C 127/128
	Resistencia fragmentación	UNE-EN 1097-2 2010	AASHTO T-96	ASTM G 65 ASTM C 944
	Plasticidad	UNE-EN 14688-2 2006	AASHTO T-90 AASHTO T 89	ASTM D 4318
	Calidad de finos	UNE 7135	AASHTO T-26	ASTM C 40-04
Propiedades Químicas	Limpieza	UNE EN 13043	AASHTO T-11	ASTM C117-03
	Contaminantes orgánicos.	UNE EN103 204-93	ASSHTOT-194/ 80	ASTM D 2487 y 2488 ASTM C 87-03
	Sales	UNE EN 17441 1998	AASHTO M144	ASTM C 330
	Sulfatos solubles en agua y acido	UNE EN 17441 1998	AASHTO T-290	ASTM C 114
	Azufre	UNE EN 17441 1998	AASHTO M-85	ASTM D 75

Cabe resaltar que estas normas no fueron aplicadas en el proyecto de investigación. Puesto que el análisis de las propiedades físicas en el Agregado Reciclado de Concreto en estudio, se ejecutó siguiendo los lineamientos de las Normas Técnicas Colombianas NTC estipuladas para los agregados naturales, las cuales son equivalente a las normas ASTM y AASHTO en su referenciación.

2.2 Normatividad Colombiana para la gestión de Residuos de Construcción y Demolición

El incremento en la demanda de prestación de bienes y servicios en las diferentes industrias se debe al notable crecimiento de la población mundial. La industria de la construcción se ha dinamizado especialmente, por el aumento demográfico y la expansión de áreas urbanas. Esto ha incrementado la explotación de recursos naturales como materia prima, que se requiere para satisfacer las necesidades prioritarias de los habitantes, como vivienda e infraestructura. De manera que es importante optar por el desarrollo de metodologías y formulación de leyes o normativas en el ámbito de desarrollo sostenible que satisfaga las necesidades socioeconómicas y, simultáneamente, resguarde los recursos ambientales, propios de cada país (Pepe, 2015).

La discusión mundial con enfoque hacia la sostenibilidad, inició en la Asamblea General de la ONU, la cual adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en la resolución 70/1 del 2015 un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. Los Estados miembros de la Naciones Unidas aprobaron una resolución en la que reconocen que el mayor desafío del mundo actual es la erradicación de la pobreza y afirman que sin lograrla no puede haber desarrollo sostenible. La Agenda plantea 17 Objetivos con 169 metas de carácter integrado e indivisible que abarcan las esferas económica, social y ambiental (Asamblea General Naciones Unidas, 2015).

Posteriormente, en Colombia el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3874 del 2016, emitió las políticas nacionales para la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario. Esta política se compone de cuatro ejes estratégicos. El primer eje busca adoptar medidas encaminadas hacia: (I) la prevención en la generación de residuos, (II) la minimización de aquellos que van a sitios de disposición final,

(III) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos, y (IV) evitar la generación de gases de efecto invernadero. Como complemento, el segundo eje apunta a mejorar la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos sólidos para incrementar los niveles de separación en la fuente, de aprovechamiento y de tratamiento. Los dos ejes adicionales están relacionados con la generación de un entorno institucional propicio para la coordinación entre actores, que promueva la eficiencia en la gestión integral de residuos sólidos. En este sentido, el tercer eje propone asignar roles específicos y claros a las entidades participantes para que lideren las actividades correspondientes, como el tratamiento de residuos orgánicos y el fortalecimiento de los sistemas urbanos de reciclaje inclusivo, entre otros. Por último, el cuarto eje desarrolla acciones para mejorar el reporte de monitoreo, verificación y divulgación de la información sectorial para el seguimiento de la política pública de gestión integral de residuos sólidos (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

En Colombia, antes de la emisión de la Resolución 0472 de 2017, la gestión de residuos se basaba en diferentes resoluciones establecidas en cada departamento y municipio. En Medellín se ejercía mediante la Resolución 541 de Ministerio del Medio Ambiente (1994) y el Decreto 1609 de Municipio de Medellín (2013), y en Santiago de Cali con el decreto 0291 de Municipio de Santiago de Cali (2005). En la actualidad, la gestión de RCD es regida por el decreto 0771 de Alcaldía de Santiago de Cali (2018), el cual es una descripción aplicada de la Resolución 0472.

En Bogotá inició la gestión de residuos mediante el decreto 2811 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente por medio de la República de Colombia (1974). El cual en el artículo 34 adopta el manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios.

Como complemento el Ministerio del Medio Ambiente (1994) lanzó la resolución 541 Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.

Actualmente, la Alcaldía de Bogotá sigue los lineamientos de la Resolución 1115 de la Secretaria Distrital de Ambiente (2012) por la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital, identificando los Generadores mediante un PIN de inscripción. Como complemento, se modifica y adiciona la resolución 0932 de la Secretaria Distrital de Ambiente (2015) la guía para el plan de gestión de RCD a adoptar por los generadores. Posteriormente la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá adopta la guía de manejo ambiental para el sector de la construcción y se toman otras determinaciones mediante la resolución 1138 de 2015.

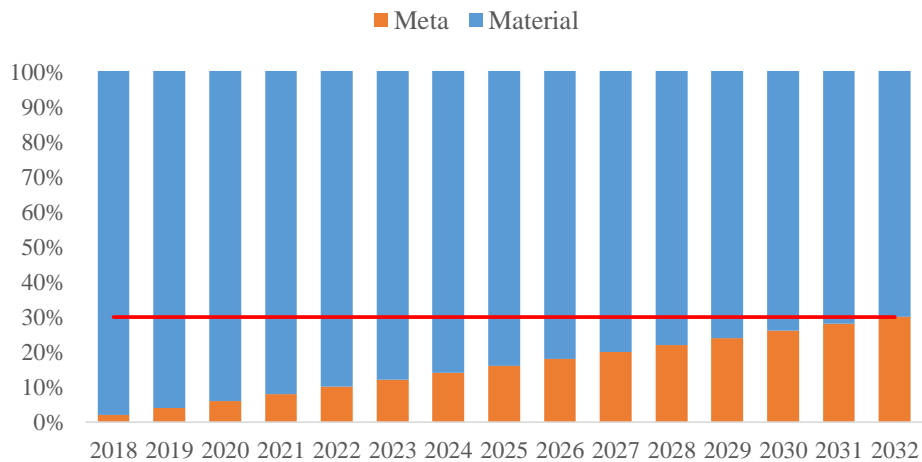
La Resolución 0472 emitida el 28 de febrero de 2017 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y establecida para el orden nacional de la república de Colombia, en la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. Empezó a regir desde el año 2018 y dispone que los grandes generadores quienes son todo aquel que genere RCD, requiera licencias de construcción y ocupen un área construida igual o superior a 2000 m², deberán utilizar los RCD aprovechables en un porcentaje no inferior al 2% en peso del total de los materiales usados en la obra, conforme a lo dispuesto en la Tabla 8 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 8. Requisitos para el aprovechamiento del RCD. **Fuente:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017)

CATEGORÍA MUNICIPAL	CUMPLIMIENTO DE META
Especial, 1, 2 y 3	1 de enero de 2018
4, 5 y 6	1 de enero de 2023

En los años posteriores se deberá garantizar un incremento anual de dos puntos porcentuales, hasta alcanzar como mínimo un 30% de RCD aprovechables en peso del total de los materiales usados en la obra (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). En la Figura 4 se muestra la evolución a través del tiempo con una reutilización del 2% anual para el aprovechamiento del RCD por parte de los grandes generadores, en el cumplimiento de las metas.

Figura 4. Reutilización del 2% anual según Resolución 0472 del 2017. **Fuente:** Propia.



A continuación, en la Tabla 9 se presenta un resumen de las normatividades, guías de manejo ambiental para la construcción, leyes referentes a residuos, decretos, resoluciones y políticas aplicables para la gestión y manejo de los RCD y residuos generales en Colombia.

Tabla 9. Normatividades para la gestión y manejo de RCD y residuos generales en Colombia. **Fuente:** (Maat Soluciones Ambientales, 2019)

NORMATIVIDAD		FECHA	DESCRIPCIÓN	DISTRITO
GUIA MANEJO AMBIENTAL PARA LA CONTRUCCION	Guía del Manejo ambiental para el sector de la construcción	Mayo de 2010	Por la cual se concreta el concepto de desarrollo sostenible para facilitar su aplicación en la vida cotidiana de las personas, cuya actividad los ubica en el sector de la construcción o para quienes realizan actividades constructivas en busca de su bienestar.	Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldía mayor de Bogotá
	Ley 1931	Julio 27 de 2018	Por la cual se establecen las directrices para la gestión del cambio climático	Congreso de Colombia
	Ley 1159	Septiembre 20 de 2019	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Rotterdam para la aplicación del procedimiento de consentimiento fundamentado previo a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos, objeto de Comercio Internacional	Congreso de Colombia
	Ley 1252	Noviembre 27 de 2008	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones	Congreso de Colombia
	Ley 430	Enero 16 de 1998	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.	Congreso de Colombia
LEYES REFERENTES RESIDUOS	Ley 253	Enero 9 de 1996	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.	Congreso de Colombia

NORMATIVIDAD	FECHA	DESCRIPCIÓN	DISTRITO	
DECRETOS	Decreto 0771	Diciembre 20 de 2018	Por el cual se reglamenta el control a la gestión integral de los residuos de construcción y demolición -RCD en Santiago de Cali y se dictan otras disposiciones	Alcaldía de Santiago de Cali
	Decreto 1289	Julio 25 de 2018	Por el cual se adiciona el Capítulo 6 al Título 1 de la Parte 3 del Libro 2 del Decreto 1081 de 2015, Único Reglamento del Sector de la Presidencia de la República, en lo relacionado con el Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.	Departament o administrativo de la presidencia de la Republica de Colombia
	Decreto 284	Febrero 15 de 2018	Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
	Decreto 586	Diciembre 29 de 2015	Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C.	Alcaldía mayor de Bogotá
	Decreto 4741	Diciembre 30 de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
Decreto 838	Marzo 23 de 2005	Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	

NORMATIVIDAD	FECHA	DESCRIPCIÓN	DISTRITO	
	Decreto 1505	Junio 6 de 2003	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
	Decreto 1140	Mayo 7 de 2003	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con el tema de las unidades de almacenamiento, y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
DECRETOS	Decreto 1713	Agosto 6 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
	Decreto 1609	Julio 31 de 2002	Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.	Ministerio de transporte
	Decreto 2695	Diciembre 26 de 2000	Por medio del cual se reglamenta el artículo 2° de la Ley 511 de 1999.	Ministerio del medio ambiente
	Resolución 1407	Julio 26 de 2018	Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
RESOLUCIONES	Resolución 1209	Junio 29 de 2018	Por la cual se adoptan los Términos de Referencia Únicos para la elaboración de los planes de contingencia para el transporte de hidrocarburos, derivados o sustancias nocivas de que trata el artículo 2.2.3.3.4.14 del Decreto 1076 de 2015 y se toman otras determinaciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible

NORMATIVIDAD	FECHA	DESCRIPCIÓN	DISTRITO
Resolución 472	Febrero 28 de 2017	Por la cual se reglamenta la gestión integral de residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
Resolución 932	Agosto 17 de 2015	Por medio de la cual se modifica y adiciona la resolución 01115 de 2012	Alcaldía mayor de Bogotá
Resolución 631	Marzo 17 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua superficiales, a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
Resolución 01115	Septiembre 26 de 2012	Por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el distrito capital	Alcaldía mayor de Bogotá
Resolución 1822	Septiembre 22 de 2009	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1684 de 2008, sobre las actividades de cierre, clausura y restauración ambiental de las celdas transitorias	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
Resolución 542	Abril 4 de 2008	Por la cual se establece el procedimiento de autorización a organismos de certificación para otorgar el derecho de uso del Sello Ambiental Colombiano y se dictan otras disposiciones	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
Resolución 1362	Abril 2 de 2007	Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hace referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial

RESOLUCIONES

NORMATIVIDAD	FECHA	DESCRIPCIÓN	DISTRITO	
RESOLUCIONES	Resolución 1402	Julio 14 de 2006	Por la cual se desarrolla parcialmente el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos o desechos peligrosos.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
	Resolución 1390	Septiembre 27 de 2005	Por la cual se establecen directrices y pautas para el cierre, clausura y restauración o transformación técnica a rellenos sanitarios de los sitios de disposición final a que hace referencia el artículo 13 de la Resolución 1045 de 2003 que no cumplan las obligaciones indicadas en el término establecido en la misma.	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
	Resolución 541	Diciembre 14 de 1994	Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación	Ministerio del medio ambiente
POLÍTICAS	Política ambiental para la Gestión Integral de Residuos o desechos peligrosos	Diciembre de 2005	Política ambiental para la Gestión Integral de Residuos o desechos peligrosos	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial

2.3 Efecto del Agregado Reciclado de Concreto en los Concretos de Alta Resistencia

Los CAR fueron una consecuencia de la evolución de la tecnología del concreto, especialmente por la utilización de aditivos superplastificantes, el elevado consumo de material cementante, la optimización granulométrica de los agregados y la incorporación de adiciones minerales. Lo anterior, trae como consecuencia concretos con elevadas resistencias mecánicas, microestructura densa, menor permeabilidad, mayor durabilidad y menor costo de mantenimiento. El ACI 363.2R define el CAR como aquel que con resistencia a la compresión mayor o igual a 56 MPa (8.000

psi) (ACI, 2018). Cabe aclarar que otros autores, clasifican este concreto en función de la relación agua/aglomerante, como aquellos con valores inferiores a 0,60 (Aïtcin, 2011).

En Colombia, no se encontraron estudios de la incorporación de residuos de concreto de alta resistencia para la fabricación de concretos. Sin embargo, a nivel mundial, diversos autores han estudiado el efecto del ARC en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del CAR, esto demuestra el interés de la comunidad científica en buscar valorizar los residuos al reincorporarlos de nuevo al ciclo de producción. Nagataki, Gokce, & Saeki (2000), investigaron el efecto de las propiedades físicas de los agregados reciclados, incluida la estructura y la cantidad de mortero adherido, en el desempeño del concreto con agregado reciclado. Los resultados indicaron que todas las posibles variaciones en las propiedades de los agregados reciclados deben tenerse en cuenta al diseñar concretos durables con agregados reciclados.

Etxeberria, Vázquez, Marí, & Barra (2007), analizaron los agregados gruesos reciclados obtenidos por concretos triturados utilizados en la producción de concretos. Se fabricaron cuatro concretos diferentes con agregado reciclado, con reemplazos del 0, 25, 50 y 100% de agregados gruesos reciclados, respectivamente. Los concretos se dosificaron para lograr la misma resistencia a la compresión, también se determinó la resistencia a la tracción. Los resultados mostraron que los concretos con reemplazos de 50 y 100%, obtuvieron resistencias a la compresión con valores inferiores de 20 a 25% comparados con el concreto de referencia a los 28 días, respectivamente. Los valores de módulo de elasticidad también fueron más bajos que la referencia. Sin embargo, los autores concluyen que la resistencia a la tracción del concreto con ARC puede ser más elevada que la del concreto convencional (ver Tabla 10).

Tabla 10. Propiedades mecánicas de los elementos de prueba cúbicos a los 28 días de curado. **Fuente:** (Etxeberria et al., 2007).

Referencia de concreto	Densidad (kg/l)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
CC	2,42	29	2,49	32.562
RC25	2,40	28	2,97	31.300
RC50	2,39	29	2,70	28.592
RC100	2,34	28	2,72	27.764

González & Etxeberria (2014), analizaron el uso de agregados de concreto reciclado en concreto de alta resistencia. Se fabricaron concretos utilizando 20, 50 y 100% de ARC como sustitución de agregados gruesos naturales. Se utilizaron tres tipos de agregados reciclados, elaborados triturando concretos originales de 100, 60 y 40 MPa de resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que, considerando las propiedades mecánicas, el reemplazo del 100% de los agregados gruesos naturales sería posible cuando se fabricara ARC a partir del concreto original con una resistencia a la compresión mínima de 60 MPa (ver Tabla 11). En cuanto a las propiedades asociadas a durabilidad, los autores concluyen que podría usarse hasta el 50% de ARC en la producción de CAR.

Tabla 11. Resistencia a la flexión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de las mezclas de concreto. **Fuente:** (González & Etxeberria, 2013).

Referencia de concreto	Resistencia a la flexión (MPa) 7 días	Resistencia a la tracción (MPa) 28 días	Módulo elástico (GPa) 28 días
CC	6,47	5,13	50
RC-20-100	7,42	5,71	49
RC-50-100	7,65	5,64	48
RC-100-100	6,84	5,12	46
RC-20-60	7,98	6,32	48
RC-50-60	6,80	5,10	44
RC-100-60	6,33	5,88	40
RC-20-40	6,70	5,31	48
RC-50-40	6,83	6,21	43
RC-100-40	6,53	4,20	37

Vinay Kumar, Ananthan, & Balaji (2017), realizaron un estudio experimental sobre la utilización del ARC grueso y fino en mezclas de Concreto de Alta Resistencia. La resistencia de dosificación de los concretos fue de 60 MPa. Los resultados experimentales indican el desempeño satisfactorio de los concretos con agregados reciclados, con respecto a las propiedades en estado endurecido. Las mezclas con 20% de ARC finos muestran una reducción en la trabajabilidad y requieren una dosis más alta de Aditivo Superplastificante, para lograr un asentamiento de 170 ± 10 mm. Las pruebas de durabilidad, como el ataque de sulfato y ácido, se realizan para la mezcla con 20% de ARC fino y grueso. Concluyeron que la mezcla es menos susceptible al ataque de sulfato y se observó la reducción significativa en la resistencia a la compresión cuando el concreto se expone a una solución de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), como se presenta en la Tabla 12.

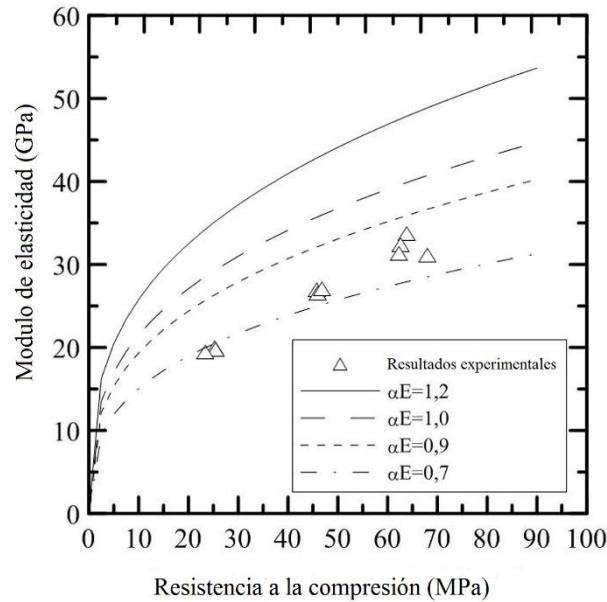
Tabla 12. Reducción de la resistencia de los cubos de concreto después de 30 días de inmersión en H_2SO_4 . **Fuente:** (Vinay Kumar et al., 2017).

Mezcla	Resistencia media a la compresión antes de la inmersión (%)	Resistencia a la compresión de cubos de concreto tras inmersión (%)	Resistencia media a la compresión después de la inmersión (%)	Promedio de reducción en la fuerza (%)
1-20-RCFG	73,30	47,05	41,15	43,86
2-20-RCFG		41,68		
3-20-RCFG		33,31		
4-20-RCFG		42,55		

Amario *et al.* (2017), analizaron la posibilidad de aplicar el modelo de empaquetamiento compresible para la dosificación de mezclas de concreto producidas con agregados reciclados de concreto. Presentaron primero un estudio preliminar en el que se investiga el procedimiento de mezcla óptimo y luego analizaron una posible extensión de la dosificación en el caso de los CAR. Se dosificaron concretos para tres clases de resistencia de 25, 45 y 65 MPa, considerando variaciones de la sustitución de agregados de 0 a 100%. Los resultados indicaron que las

propiedades mecánicas no se vieron afectadas al aumentar el contenido de ARC, independientemente de la clase de resistencia. Además, la compresión mostró una alta correlación con los valores pronosticados por el Modelo de Empaquetamiento Compresible (ver Figura 5).

Figura 5. Correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión. **Fuente:** (Amario et al., 2017).



Hamad & Dawi (2017), investigaron las propiedades en estado fresco y endurecido de un CAR producido con la sustitución, parcial o total, de los agregados naturales por agregados reciclados de concreto procedentes de cilindros ensayados en plantas dosificadoras. Las variables fueron la resistencia a compresión, 28 o 60 MPa, y el porcentaje de reemplazo de agregados gruesos naturales con agregados reciclados, entre el 0, 20, 40, 60, 80 o 100%. Cilindros ensayados de resistencia normal se utilizaron como fuente de los agregados reciclados para la mezcla de concreto de resistencia normal (ARC-CC) y los cilindros probados de alta resistencia para la mezcla de concreto de alta resistencia (ARC-CAR), como se realizó en la presente investigación.

Los resultados indicaron que no hubo un efecto significativo en la consistencia del concreto fresco y hubo una reducción promedio del 10% en las propiedades mecánicas para ambos niveles investigados de resistencia a la compresión del concreto (ver Tabla 13).

Tabla 13. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para las mezclas ARC-CC y ARC-CAR. **Fuente:** (Hamad & Dawi, 2017).

Mezcla	Mezclas ARC-CC				Mezclas ARC-CAR			
	Valor promedio 3 días (MPa)	Valor promedio 7 días (MPa)	Valor promedio 28 días (MPa)	% De reducción con relación a R0	Valor promedio 3 días (MPa)	Valor promedio 7 días (MPa)	Valor promedio 28 días (MPa)	% De reducción con relación a R0
R0 ^a	15,90	20,90	34,10	-	45,70	49,30	58,00	-
R20 ^b	12,70	19,20	31,30	8,36	41,40	44,90	51,90	10,60
R40	12,20	19,50	31,40	7,92	40,80	44,30	51,80	10,77
R60	11,30	19,80	31,60	7,48	41,70	45,30	52,70	9,22
R80	11,80	19,50	29,80	12,61	40,00	43,10	49,70	14,39
R100	12,50	19,20	29,80	12,61	41,00	43,50	51,60	11,03

a. R0 es la mezcla de control con cero reemplazos de ARC-CC y ARC-CAR.

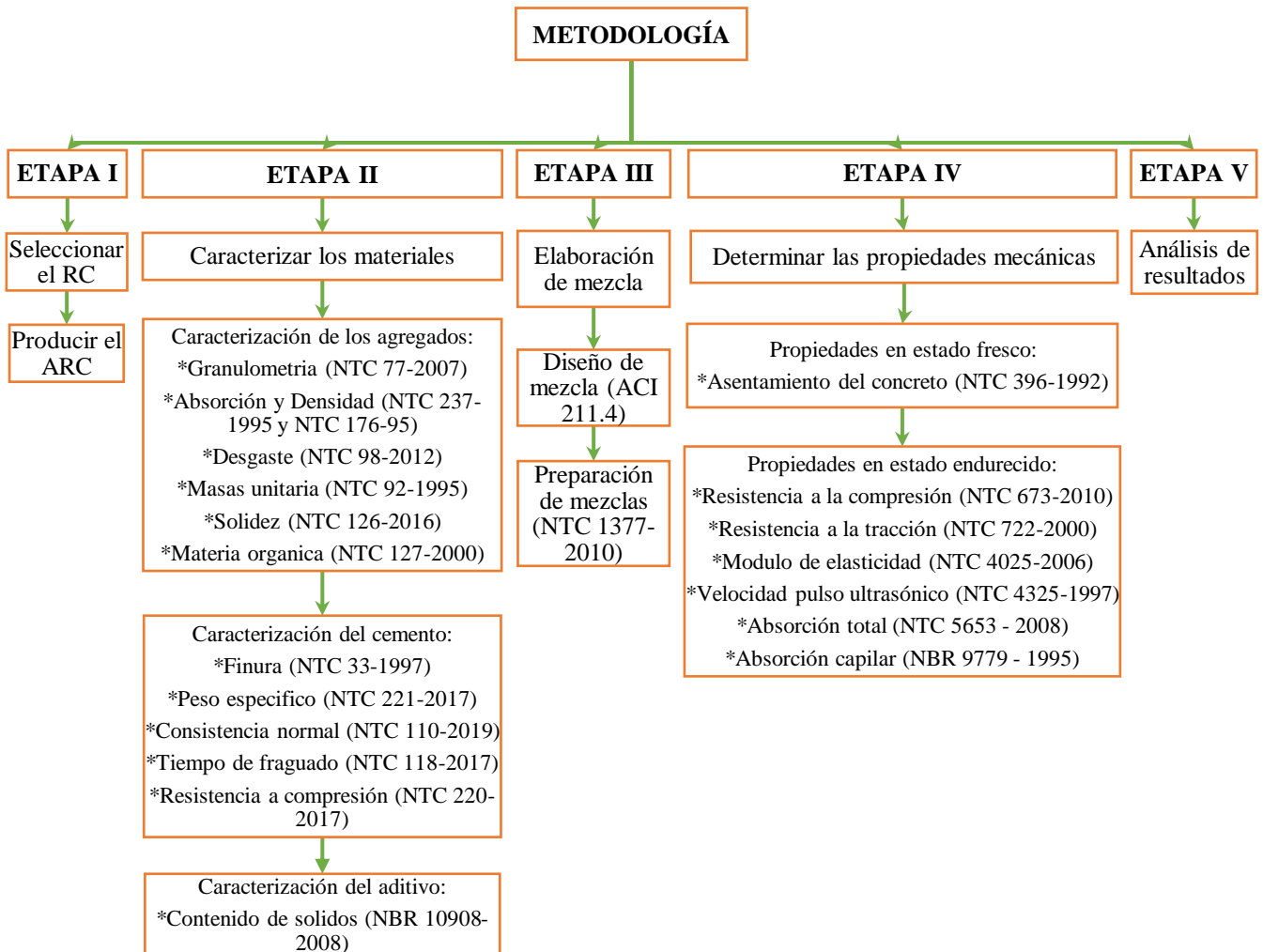
b. R20 es la mezcla con 20% de reemplazo de ARC-CC y ARC-CAR.

En el estudio del arte anteriormente expuesto, se evidencia la importancia de este trabajo de grado, dado que se observa cómo varios investigadores han encontrado distintas ventajas técnicas en la utilización del ARC en el concreto. De esta manera, el uso de este tipo de agregados podría ser una solución a la necesidad de mitigar el impacto ambiental negativo de los RCD, apoyado en resultados científicos con sustento investigativo que serán útiles en el presente proyecto. Este análisis permitirá contextualizar el aporte del trabajo en relación a la frontera del conocimiento, con el fin de valorizar los residuos de concreto y viabilizar su reincorporación en el ciclo constructivo.

3 METODOLOGÍA

Para dar alcance al objeto del proyecto, se desarrolló la metodología experimental compuesta por cinco etapas, la primera trataba sobre la selección y posterior producción del agregado reciclado de concreto, la segunda se enfocó en la caracterización de los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto, la tercera tuvo como objetivo la fabricación de los concretos con diferentes contenidos de ARC, la cuarta determinó las propiedades en estado fresco y endurecido de dichos concretos y, finalmente, en la etapa cinco se realizó el análisis de los resultados. Lo anterior, se presenta a manera de mapa conceptual en la Figura 6.

Figura 6. Metodología. Fuente: Propia.



3.1 Programa Experimental

Con el fin de cumplir con los objetivos del estudio, en la Tabla 14 se presenta la matriz experimental del proyecto que incluye las variables independientes y las variables dependientes de la investigación. La nomenclatura de los concretos se escogió en función del porcentaje de reemplazo del agregado, siendo que la mezcla de referencia (CB) no posee ARC y los concretos con 10, 20 y 40% fueron nombrados como RC10, RC20 y RC40, respectivamente.

Tabla 14. Matriz experimental de CAR con ARC. **Fuente:** Propia.

MEZCLA	VARIABLES INDEPENDIENTES					VARIABLES DEPENDIENTES						
	Relación a/c	Asentamiento (cm)	Tiempo (días)			ARC (%)	Resistencia compresión	Resistencia tracción	Módulo de elasticidad	Ultrasonido test	Absorción total	Absorción capilar
			7	28	56							
CB	0,37	10	x	x	x	0						
RC10	0,37	10	x	x	x	10	7, 28 y 56 días	7 y 28 días	28 días	Ensayos compresión, tracción y módulo de elasticidad	28 días	28 días (1,3,6,24,48 y 72 hr)
RC20	0,37	10	x	x	x	20						
RC40	0,37	10	x	x	x	40						

Para el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo un total de 104 ensayos, lo que quiere decir que para cada tipo de concreto fueron ejecutados 26 ensayos representados en cada variable dependiente. En la Tabla 15 se expone la matriz de ensayos en cada una de las mezclas realizadas en la investigación para la determinación de las propiedades en estado endurecido. Lo anterior, teniendo como objetivo analizar la viabilidad del uso de ARC de acuerdo con los porcentajes de reemplazo en los CAR.

Tabla 15. Matriz de ensayos para cada mezcla. **Fuente:** Propia.

	Propiedades en estado endurecido	Edad (días)		
		7	28	
Cantidad de especímenes	Resistencia a la compresión	4	4	
	Velocidad de pulso ultrasónico	Resistencia a la tracción	3	3
		Módulo de elasticidad		3
		Absorción total		3
		Absorción capilar		3
		SUB-TOTAL	7	16
TOTAL DE ESPECÍMENES		92		

3.2 Producción del Agregado Reciclado de Concreto

Para la producción del ARC se seleccionaron los residuos de los especímenes de control de calidad de mezclas de concretos de alta resistencia, ensayados en el Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana – Cali. Estos cilindros de ensayo hacían parte de investigaciones anteriores, con valores de resistencia a la compresión entre 60 y 80 MPa. De acuerdo con González & Etxeberria (2013), la selección del agregado toma importancia debido a que un agregado proveniente de un concreto de menor resistencia afectaría las propiedades requeridas para un CAR.

Es preciso anotar, que las materias primas utilizadas para la fabricación de los especímenes de concreto fueron: cemento de Alta Resistencia Temprana (ART), arena natural procedente del río Cauca y agregados de trituración de las diferentes canteras de la ciudad de Cali (TMN de 3/8”). En la Figura 7 se observan los residuos utilizados.

Figura 7. (a) Especímenes de control del laboratorio (b) Selección de cilindros con resistencia entre 60-80 MPa (c) Cantidad de material a utilizar. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)



(c)

Una vez seleccionados los residuos de concreto a utilizar, se procedió a fabricar el ARC por medio del uso de una trituradora de mandíbula, ver Figura 8.

Figura 8. (a) Trituradora de mandíbula (b) Mandíbula. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

Cabe aclarar, que en el proceso de trituración fue necesario disminuir, previamente, el tamaño de los fragmentos de los cilindros con la ayuda de una prensa a compresión, debido a la limitación de la separación de las mandíbulas del equipo y para obtener una mayor eficiencia a la hora de triturar y producir los agregados reciclados, como se presenta en la Figura 9.

Figura 9. (a) Prensa manual (b) Fragmentación de los cilindros. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

Luego de fragmentar los cilindros se inicia la producción de ARC con la trituración de los especímenes seleccionados mediante el equipo de mandíbula, arrojando un rendimiento aproximado de 2,10 kg/min y un desperdicio del 1,93%, como se observa en la Figura 10.

Figura 10. (a) Proceso de trituración (b) Cantidad de ARC. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

Posteriormente, se inició el proceso de separación de los agregados gruesos y finos por medio del tamiz #4 (\varnothing 4,75mm), con el fin de obtener el ARC grueso de alta resistencia, foco de este proyecto. En la Figura 11 se observan detalles de este proceso.

Figura 11. (a) Tamiz #4 (b) ARC Tamizado. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

Con el objetivo de evaluar el efecto de la retritución en el ARC, se fabricaron inicialmente dos tipos de agregado. El primero se ejecutó mediante un único proceso de trituración y el segundo se realizó triturando una vez más la muestra obtenida. Posteriormente, se hizo el cuarteo del material triturado (Figura 12) para realizar el análisis granulométrico de los agregados y de esta manera escoger el ARC a utilizar.

Dado que el material obtenido con una única trituración presentó una mejor granulometría y cumplió con los parámetros de la norma NTC 174 (2000), se tomó la decisión de implementar este agregado para el desarrollo del proyecto. Estos resultados se analizaron en el ítem 3.3.4.

Figura 12. Equipo de cuarteo. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3 Materiales Constituyentes

Los materiales de esta investigación fueron suministrados de acuerdo con la disponibilidad de la región. Para el desarrollo experimental se utilizaron: cemento ART, agregado fino de río, agregado grueso de trituración, ARC y aditivo superplastificante. Siguiendo la normativa colombiana se caracterizaron cada uno de los materiales constituyentes para fabricar las mezclas de concreto. Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Mezclas de la Pontificia

Universidad Javeriana de Cali. A continuación, se presenta una descripción de cada material, así como de los resultados obtenidos. En el capítulo de anexos se adjuntan formatos respectivos de cada uno de los ensayos de la caracterización.

3.3.1 Cemento

En el presente estudio experimental se utilizó un cemento hidráulico de Alta Resistencia Temprana (ART), dado que es un aglomerante que tiene alta empleabilidad y es de uso común en la fabricación de concretos de alta resistencia y elementos prefabricados. El resumen de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas del cemento se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Propiedades físicas y mecánicas del cemento. **Fuente:** Propia.

Ensayo	Unidad	Resultado	Norma
Finura - Área específica	cm ² /g	4.875	(NTC 33, 1997)
Peso específico	g/cm ³	3,14	(NTC 221, 2017)
Consistencia normal relación a/c	%	26,9	(NTC 110, 2019)
Tiempo de fraguado	Inicial	h:min	01:30
	Final	h:min	02:30
Resistencia a compresión	1 día	MPa	12,5
	3 días	MPa	20,8
	7 días	MPa	27,7

3.3.1.1 Finura

El método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico fue el del aparato Blaine de permeabilidad al aire. Este resultado se expresa en términos de la superficie específica, como el área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento o metros cuadrados por kilogramo de cemento (NTC 33, 1997), como se muestra en la Figura 13 y el Anexo 1.

Figura 13. Aparato de Blaine, Ensayo de Finura cemento. **Fuente:** Propia



3.3.1.2 Peso específico

Para medir la densidad del cemento se ejecutó el ensayo según las recomendaciones de la norma NTC 221 (2017). La principal utilidad de esta propiedad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto. Detalles del concreto se observan en la Figura 14 y el Anexo 2.

Figura 14. (a) Ensayo densidad del cemento (b) probeta de ensayo. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3.1.3 Consistencia normal

Para precisar la consistencia normal del cemento hidráulico se determinó de acuerdo con la norma NTC 110 (2019), ver Anexo 3 y Figura 15. El resultado de este ensayo se utiliza para determinar los tiempos de fraguado del cemento.

Figura 15. (a) Preparación de mezcla (b) Molde de prueba (c) Ensayo para determinar la consistencia normal del cemento. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

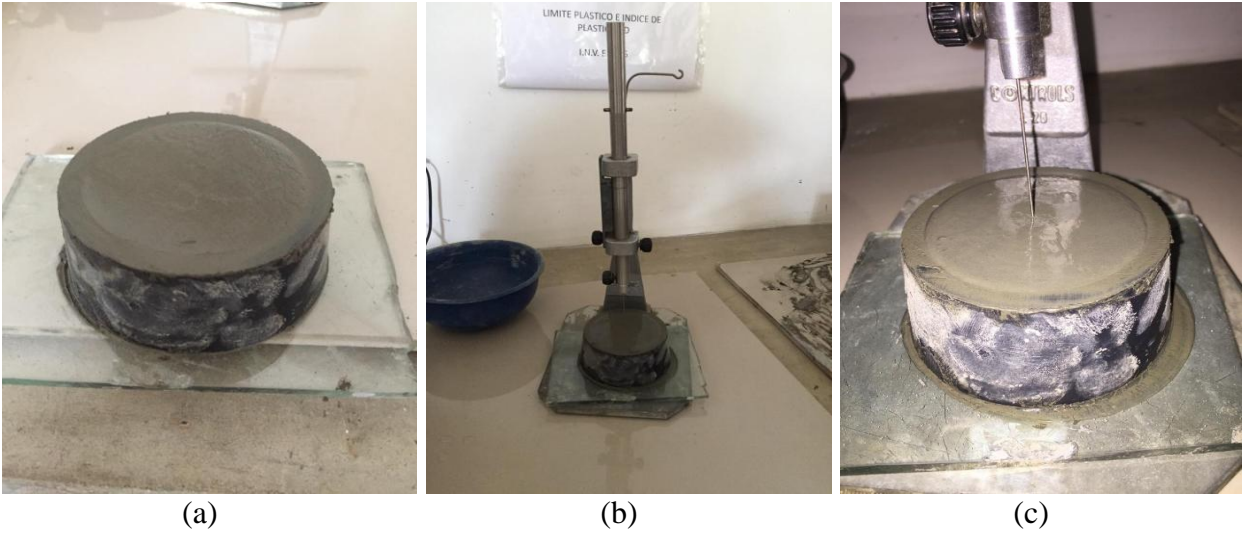


(c)

3.3.1.4 Tiempo de fraguado

Con el fin de determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat, se preparó una pasta de consistencia normal y se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 118 (2017), ver Anexo 4 y Figura 16.

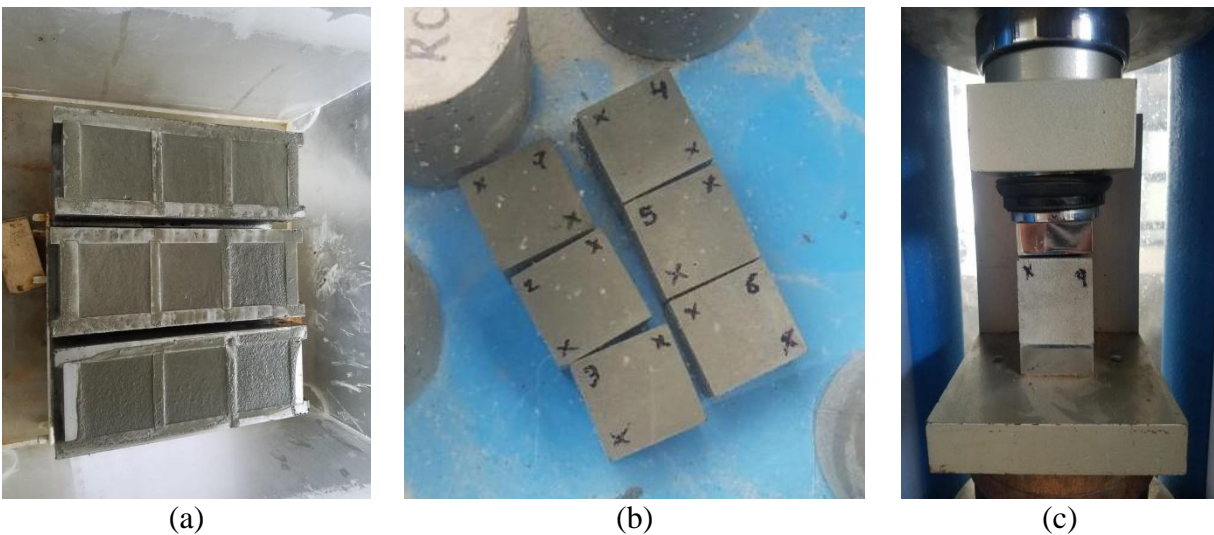
Figura 16. (a) Pasta de consistencia normal (b) Equipo de Vicat (c) Ensayo tiempo de fraguado cemento. **Fuente:** Propia.



3.3.1.5 Resistencia a compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico utilizando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado se ejecutó el ensayo según las recomendaciones de la norma NTC 220 (2017). Más detalles de pueden ver en el Anexo 5, el Anexo 6 y la Figura 17.

Figura 17. (a) Elaboración cubos de 50mm (b) Curado de cubos (c) Ensayo resistencia a la compresión del cemento. **Fuente:** Propia.



3.3.2 Agregado fino

El agregado fino utilizado en el proyecto fue una arena media proveniente del Río Cauca, en cumplimiento con las normas colombianas para su uso en concretos y morteros. El resumen de las propiedades físicas del agregado fino se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Características físicas de la Arena media de río. **Fuente:** Propia.

Ensayo		Unidad	Resultado	Norma
Granulometría	MF	-	2,93	
	TM	mm	9,50	(NTC 77, 2007)
	TMN	mm	4,75	
Masa unitaria	Compacta	kg/l	1,78	(NTC 92, 1995)
	Suelta	kg/l	1,62	
Materia Orgánica		Rango N°	3	(NTC 127, 2000)
Peso específico SSS		-	2,82	(NTC 237, 1995)
Absorción		%	2,35	
Solidez		% Pérdida	32,7	(NTC 126, 2016)

3.3.2.1 Granulometría

Con el fin de determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos, a través de un proceso de tamizado. Se siguió las recomendaciones de la norma NTC 77 (2007), ver Anexo 7 y Figuras 18 y 19.

Figura 18. (a) Equipo de tamizado (b) Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos.
Fuente: Propia.



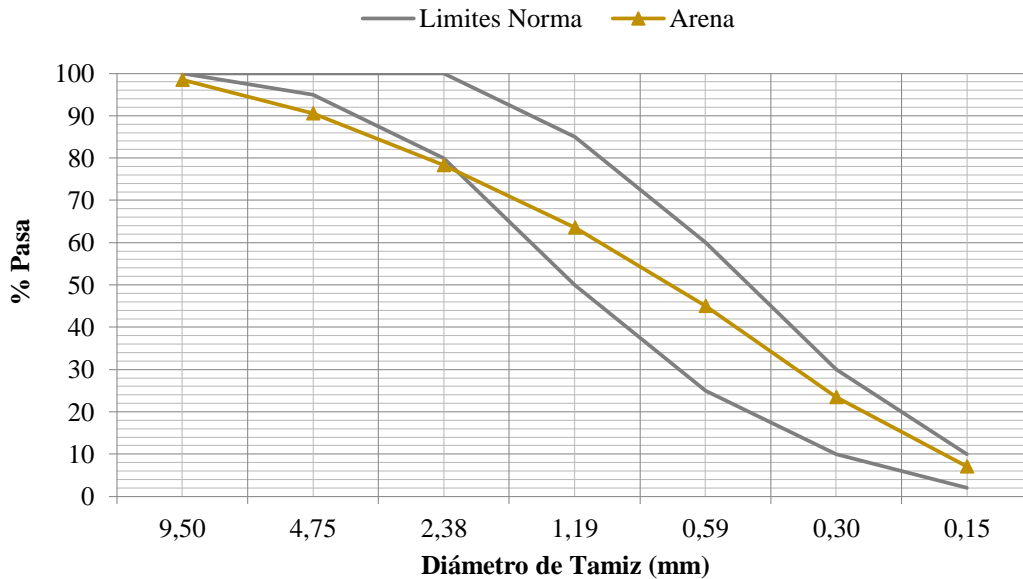
(a)



(b)

En la Figura 19 se presenta la curva granulométrica de la arena utilizada. Como se observa, en lo tamices superiores se acerca al límite inferior de la norma, sin embargo, después de esto el material cumple los límites especificados de la norma NTC 174 (2000), que establece los requisitos de gradación y calidad en los agregados finos y gruesos, para su uso en concreto.

Figura 19. Granulometría agregado fino, límites NTC-32 (ASTM E 11). **Fuente:** Propia.



3.3.2.2 Masas unitarias

Para determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 92 (1995), que se aplica a agregados que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal. La Figura 20 presenta el procedimiento de ensayo, los resultados están disponibles en el Anexo 8.

Figura 20. (a) Arena seca al aire para masas unitarias (b) Proceso de compactación. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3.2.3 Materia orgánica

El método de ensayo que determina la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales para el agregado fino usado en mortero de cemento hidráulico o en concreto (ver Anexo 9 y Figura 21), se realizó de acuerdo a la NTC 127 (2000).

Figura 21. (a) Ensayo de materia orgánica en arena fina (b) Rango del colorímetro después de 24 hrs.
Fuente: Propia.



(a)



(b)

Como se observa el agregado fino obtuvo un valor de 3 en la escala de colores, cumpliendo con los requisitos de calidad de los agregados para su uso en concretos de la norma NTC 174 (2000).

3.3.2.4 Peso específico y absorción

Para la determinación del peso específico y la absorción del agregado fino, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 237 (1995), a una condición de temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver Anexo 10 y Figura 22).

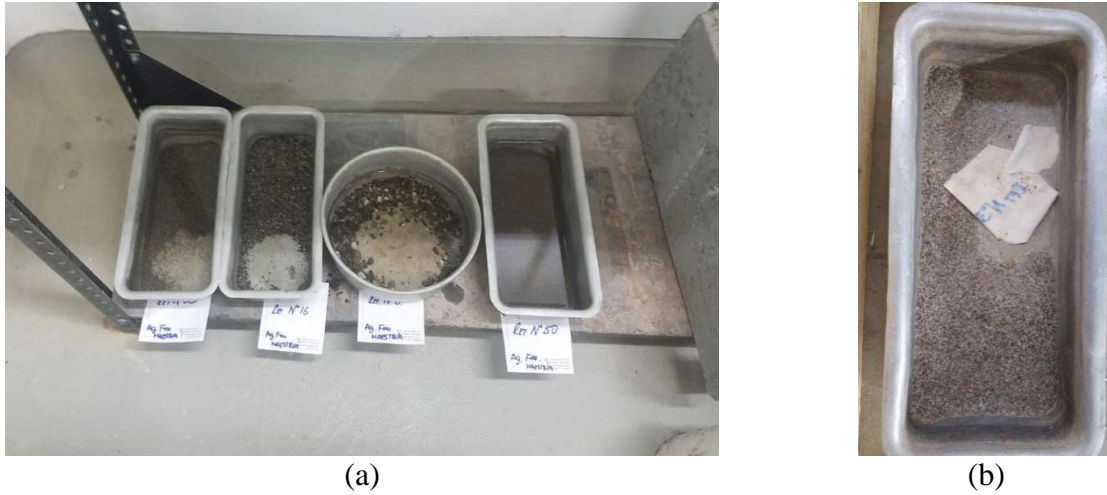
Figura 22. Ensayo gravedad específica y absorción en arena fina, matraz de ensayo. **Fuente:** Propia.



3.3.2.5 Solidez

El objetivo de este ensayo es estimar la solidez de los agregados, cuando se someten a la acción del clima en aplicaciones del concreto. La norma NTC 126 (2016) estipula que se debe realizar la inmersión repetida del agregado en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguidas por el secado en horno hasta deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los espacios permeables de los poros. La fuerza expansiva interna, derivada de la rehidratación de la sal después de repetir la inmersión, simula la expansión del agua al congelarse. Este método proporciona información útil cuando no se dispone de información sobre los registros en servicio del material expuesto a condiciones de intemperie reales (ver Anexo 11 y Figura 23).

Figura 23. (a) Inmersión agregado fino en sulfato de sodio (b) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. **Fuente:** Propia.



3.3.3 Agregado grueso

En el presente estudio experimental se utilizó grava proveniente de una cantera de la región, que cumple con todas las especificaciones colombianas para su uso en concretos. El resumen de las propiedades físicas del agregado grueso se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Características físicas del agregado grueso. **Fuente:** Propia.

Ensayo		Unidad	Resultado	Normas
Granulometría	MF	-	6,69	(NTC 77, 2007)
	TM	mm	25,4	
	TMN	mm	19,1	
Desgaste		%	17,3	(NTC 98, 2012)
Masa unitaria	Compacta	kg/l	1,55	(NTC 92, 1995)
	Suelta	kg/l	1,44	
Peso específico SSS		-	2,67	(NTC 176, 1995)
Absorción		%	1,01	
Solidez		% Perdida	1,18	(NTC 126, 2016)

3.3.3.1 Granulometría

Siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 77 (2007), a través de un proceso de tamizado, se determinó la distribución de los tamaños de partículas que componen el agregados grueso. En

la Figura 24 se muestra el procedimiento y en la Figura 25 se presenta la curva granulométrica del material (los resultados pueden ser consultados en el Anexo 12).

Figura 24. (a) Equipo de tamizado (b) Tamices para ensayo de granulometría en agregados gruesos.
Fuente: Propia.

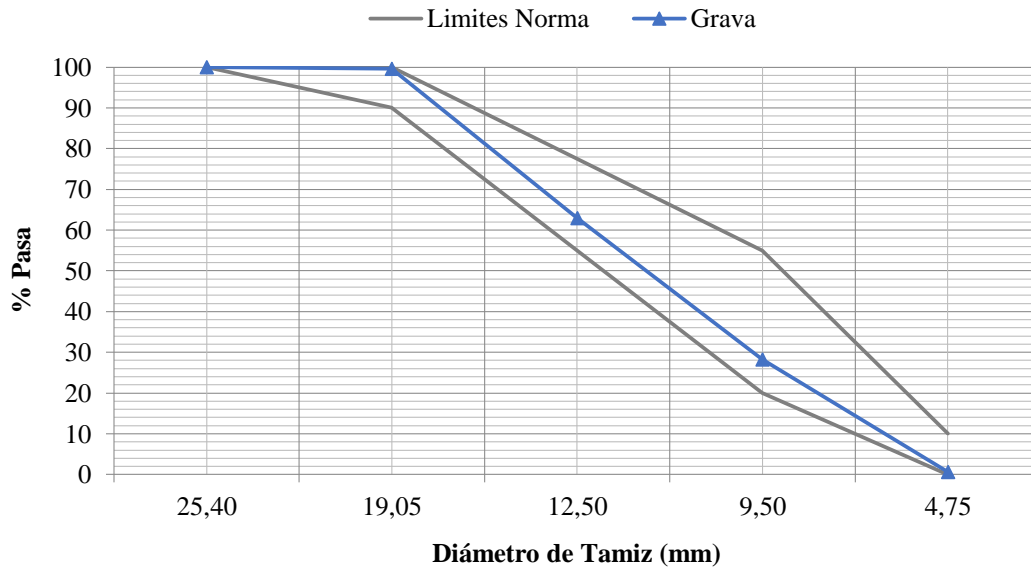


(a)



(b)

Figura 25. Granulometría agregado grueso, límites NTC 174 (Quinta actualización). **Fuente:** Propia.



Como se observa en la anterior Figura 25, el agregado grueso utilizado, cumple con las especificaciones de la norma NTC 174 (2000), que establece los requisitos de gradación y calidad de los agregados gruesos, para su uso en concretos.

3.3.3.2 Desgaste

Con el fin de determinar la resistencia al desgaste, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 98 (2012), para tamaños de agregados menores de 37,5 mm (1 1/2 de pulgada), utilizando la máquina de Los Ángeles (ver Anexo 13 y Figura 26). El agregado cumple con la especificación de la norma NTC 174 (2000), pues el valor obtenido en este ensayo 16,3% fue menor al estipulado de 50%.

Figura 26. Máquina de los ángeles utilizada para el desgaste en agregados gruesos. **Fuente:** Propia.



3.3.3.3 Masas unitarias

Siguiendo la norma NTC 92 (1995) se determina la masa unitaria en condición compactada y suelta, para el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados gruesos. Esta norma aplica en agregados que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal (ver Anexo 14 y Figura 27).

Cabe anotar que la masa unitaria compacta es un parámetro que se utiliza en la dosificación del concreto.

Figura 27. (a) Molde de muestra (b) Ensayo de masa unitaria en condición compacta para agregados gruesos. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3.3.4 Peso específico y absorción

Según la norma NTC 176 (1995), este método de ensayo no está previsto para ser usado con agregados livianos y tiene como objeto determinar la densidad, el peso específico y la absorción del agregado grueso (ver Anexo 15 y Figura 28).

Figura 28. Agregado grueso sumergido para ensayo de densidad específica y absorción. **Fuente:** Propia.



3.3.3.5 Solidez

Este ensayo se ejecutó siguiendo las recomendaciones para agregado grueso de la norma (NTC 126, 2016) En la Figura 29 se presenta el procedimiento de ensayo y los resultados pueden consultarse en el Anexo 16. El agregado cumple con la especificación de la norma NTC 174 (2000) pues el valor encontrado de 1,18%, fue inferior al límite exigido (12%).

Figura 29. (a) Inmersión agregado grueso en sulfato de sodio (b) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3.4 Agregado Reciclado de Concreto

En el presente estudio experimental se utilizó agregado reciclado de concreto proveniente de los especímenes de CAR realizados en investigaciones anteriores y ensayadas en el Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. El resumen de las características físicas del ARC se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Características físicas del ARC. **Fuente:** Propia.

Ensayo		Unidad	Resultado	Normas empleadas
Granulometría	MF	-	6,72	
	TM	mm	25,4	(NTC 77, 2007)
	TMN	mm	19,1	
Desgaste		%	30,5	(NTC 98, 2012)
Masa unitaria	Compacta	kg/l	1,34	(NTC 92, 1995)
	Suelta	kg/l	1,25	
Peso específico SSS		-	2,54	(NTC 176, 1995)
Absorción		%	5,42	
Solidez		% Perdida	7,56	(NTC 126, 2016)

3.3.4.1 Granulometría

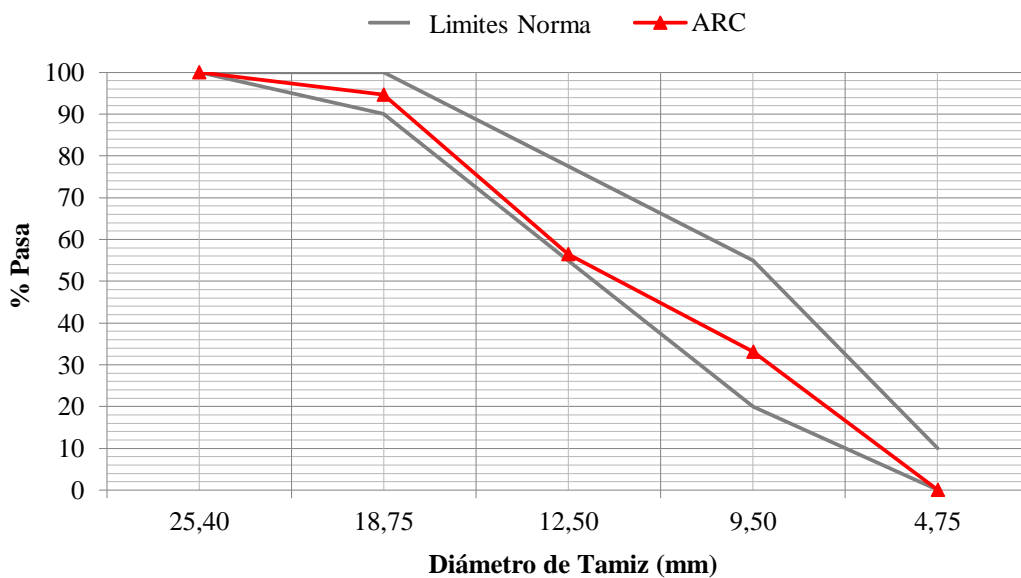
Con el fin determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados gruesos, a través de un proceso de tamizado se siguió la norma NTC 77 (2007). En la Figura 30 se muestran los tamices utilizados y en el Anexo 17 se encuentran los resultados.

Figura 30. Tamices utilizados para ensayo de granulometría en ARC. **Fuente:** Propia.



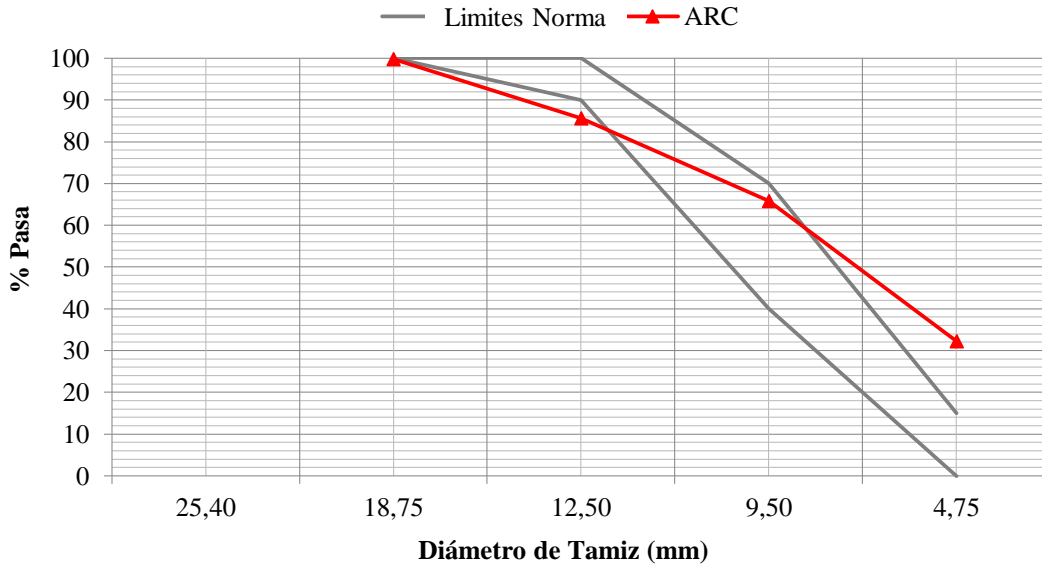
Como se explicó en el ítem 3.2 de producción del ARC; la Figura 31 se presenta la granulometría del ARC (con un único proceso de trituración) que fue utilizado en este proyecto. Este agregado cumple con la especificación de la norma NTC 174 (2000) que establece los requisitos de calidad en los agregados, para su uso en concretos.

Figura 31. Granulometría ARC 1er trituración, límites NTC-174. **Fuente:** Propia.



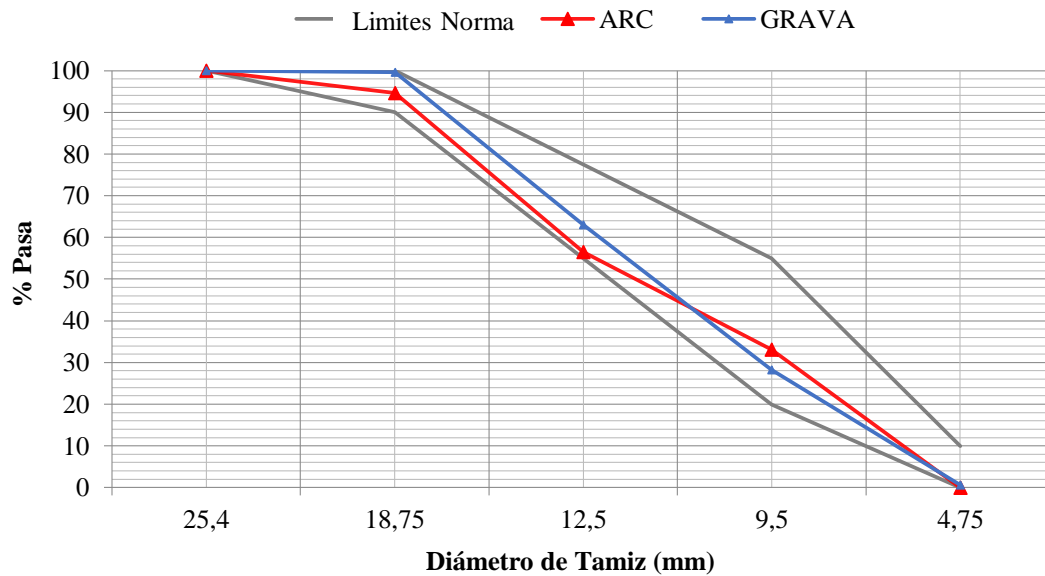
En la Figura 32 se presenta la curva granulométrica del agregado con doble proceso de trituración. Se concluye que, debido al incremento en el contenido de material fino, no fue necesario un segundo proceso de trituración del residuo.

Figura 32. Granulometría ARC 2da Trituración, límites NTC-174. **Fuente:** Propia.



Dado que este proyecto evalúa el reemplazo del agregado grueso en porcentajes parciales por ARC, se realizó (ver Figura 33) una comparación de la distribución granulométrica de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto de esta investigación.

Figura 33. Comparación granulometría ARC Vs Grava, límites NTC-174. **Fuente:** Propia.



3.3.4.2 Desgaste

Para determinar la resistencia al desgaste, utilizando la máquina de Los Ángeles (ver Figura 34), se ejecutó las prescripciones de la norma NTC 98 (2012), en agregados con tamaños menores a 37,5 mm (1 1/2"). Los resultados se presentan en el Anexo 18. Se concluye que el ARC cumple con la especificación de la norma NTC 174 (2000) porque el resultado de 30,5%, es inferior al límite exigido de 50%.

Figura 34. Máquina de los ángeles utilizada para el desgaste en ARC. **Fuente:** Propia.



3.3.4.3 Masas unitarias

Para determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados se empleó la norma NTC 92 (1995) la cual aplica a agregados que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal, ver Anexo 19 y Figura 35.

Figura 35. (a) Molde de muestra (b) Ensayo de masa unitaria en condición suelta para agregados reciclados. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.3.4.4 Peso específico y absorción

Estas propiedades se determinaron siguiendo las indicaciones de la norma NTC 176 (1995). En la Figura 36 se observa la muestra de agregado reciclado sumergido y en el Anexo 20 pueden ser consultados los resultados.

Figura 36. ARC sumergido para ensayo de peso específico y absorción. **Fuente:** Propia.



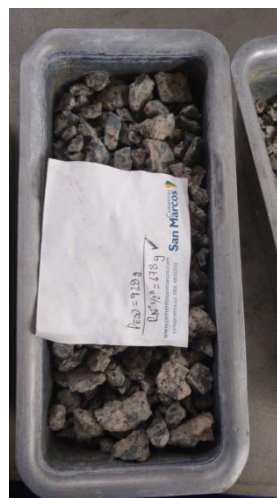
3.3.4.5 Solidez

Como se explicó anteriormente, para la ejecución de este ensayo (ver Anexo 21 y Figura 37) se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 126 (2016). Se concluye que el agregado reciclado cumple con la norma NTC 174 (2000), porque el resultado de 7,36% es menor al límite normativo de 12,0%.

Figura 37. (a) Inmersión ARC en sulfato de sodio (b) y (c) Estado del agregado después de inmersión y secado en horno. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)



(c)

3.3.5 Aditivo superplastificante

En el presente estudio experimental se utilizó un aditivo superplastificante de base acrílica modificada para concretos preparados y caracterizados por una baja relación agua/cemento, así como largo mantenimiento de la trabajabilidad incluso en climas calurosos. El producto utilizado es Dynamon SR100 provenientes de la casa comercial MAPEI Dynamon SR, el cual es una solución acuosa de polímeros acrílicos (sin formaldehidos) capaces de dispersar eficazmente los gránulos de cemento y de favorecer un desarrollo lento de los productos de hidratación del cemento (MAPEI, 2014).

El resumen de las características físicas del aditivo se muestra en la Tabla 20 y se puede observar con mayor detalle las características del producto en la ficha técnica, ver Anexo 22.

Tabla 20. Características del aditivo superplastificante. **Fuente:** Propia.

Ensayo	Unidad	Resultado
Contenido de solidos	%	56,8
Densidad (Ficha técnica)	g/cm ³	1,15
pH (Ficha técnica)	-	7 ± 1

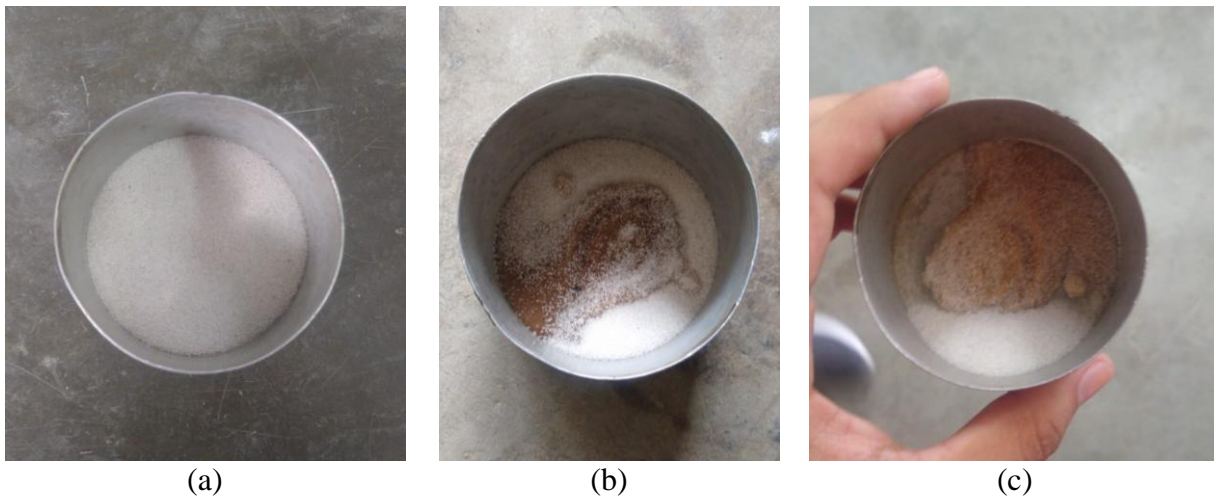
3.3.5.1 Contenido de solidos

Con el objetivo de determinar el contenido de solidos presentes en el aditivo utilizado, se empleó el procedimiento estipulado por la norma NBR 10908 (2008), que se describe a continuación:

1. Se pesaron aproximadamente 10 g de muestra de aditivo (con precisión de 0,0001g) en un recipiente que contiene de 25 a 30 g de arena previamente seca a masa constante en el horno a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

2. Posteriormente, el conjunto se lleva al horno a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, durante un tiempo de 8 h, se deja enfriar 2 h y se pesa. Se lleva de nuevo al horno por 2 h, se deja enfriar y se pesa nuevamente.
3. El paso anterior se repita hasta cuando la diferencia entre las mediciones consecutivas no sea mayor al 0,1% del peso inicial medido en el primer periodo de secado (8 h).
4. El valor del contenido de sólidos se determina en porcentaje, como la relación entre la masa del residuo seco y la masa de la muestra. Detalles sobre este ensayo se presentan en la Figura 38, mayor información puede verificarse en el Anexo 23.

Figura 38. (a) Muestra de arena de sílice seca (b) Muestra de arena de sílice seca + aditivo (c) Estado de la arena de sílice mezclada con aditivo y secado en horno. **Fuente:** Propia.



3.4 Métodos de Ensayo

3.4.1 Elaboración de concretos

Se realizaron las mezclas del concreto base (CB) y aquellos con remplazo parcial del 10% (RC10), 20% (RC20) y 40% (RC40) de agregados gruesos naturales por ARC, siguiendo las recomendaciones de la secuencia de mezclado de los materiales descrita por Lopes (2011), que se

presenta en la Tabla 21. Adicionalmente, en la Figura 39 se observan detalles de la elaboración de los concretos. Adicionalmente, en la Figura 39 se observan detalles de la elaboración de los concretos.

Tabla 21. Secuencia de mezclado de los materiales a emplear en el proyecto. **Fuente:** (Lopes, 2011)

Nro.	Etapa	Tiempo (s)
1	Agregado grueso y 1/3 del agua	30
2	Cemento	120
3	Parte de la arena, poco a poco con la mezcladora en movimiento	
4	1/3 del agua	
5	Restante de arena y raspado de paredes	150
6	1/3 del agua (final)	
7	Aditivo superplastificante	300

Figura 39. (a) y (b) Materiales constituyentes para las mezclas. (c) Mezcladora y equipos. (d) Elaboración de las mezclas. **Fuente:** Propia.





(c)



(d)

La composición teórica de los materiales para el estado de humedad de los agregados saturados superficialmente secos (SSS), así como los parámetros de las mezclas de concreto se pueden observar en la Tabla 22.

Tabla 22. Composición y parámetros de las mezclas de concreto. **Fuente:** Propia.

PARÁMETROS	MEZCLA	CB	RC10	RC20	RC40
Datos de composición (kg/m ³)	Agua	201	201	201	201
	Cemento	550	550	550	550
	Ag. Fino	610	610	610	610
	Ag. Grueso	1100	990	880	660
	ARC	0	110	220	440
	Aditivo SP	3	3	3	9
Parámetros de mezcla	Relación a/c	0,37	0,37	0,37	0,37
	Relación Ag. G. / Ag. F.	1,8	1,6	1,4	1,1
	Mortero seco (%)	51,3%	51,3%	51,3%	51,3%
	Agua/Materiales secos (%)	8,9%	8,9%	8,9%	8,9%

Una vez obtenidas las mezclas con su respectiva composición teórica, se realizó el ajuste por humedad de los agregados, tal y como se especificó en el paso número 10 del capítulo 4 de dosificación, dado que está expresada en SSS. Estos ajustes se efectuaron para cada una de las mezclas a realizar en el proyecto.

La cantidad de mezcla para cada ensayo fue de 42 litros, con el fin de fabricar los 23 especímenes de prueba cilíndricos de 10x20cm, siguiendo las recomendaciones de elaboración y curado de la norma NTC 1377 (2010), como se muestra en la Figura 40.

Figura 40. (a) Elaboración de los cilindros de prueba. (b) Curado de los especímenes de ensayo para las mezclas de concreto. **Fuente:** Propia.



3.4.2 Estado fresco (Slump)

Con el fin de verificar la trabajabilidad para cada concreto elaborado en el proyecto se determinó el asentamiento utilizando el cono de Abrams mediante las recomendaciones de la norma NTC 396 (1992), como se puede observar en la Figura 41.

Figura 41. (a) y (b) Procedimiento empleado, utilizando el cono de Abrams. (c) Asentamiento CB. (d) Asentamiento RC10. (e) Asentamiento RC20. (f) Asentamiento RC40. **Fuente:** Propia.



En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos de la trabajabilidad del concreto determinada mediante el asentamiento con el cono de Abrams de cada una de las mezclas elaboradas en el proyecto.

Tabla 23. Resultados asentamiento de las mezclas en estado fresco. **Fuente:** propia.

MEZCLA	ASENTAMIENTO (cm)
CB	10
RC10	8
RC20	12
RC40	3,5

Se observa que la incorporación del ARC en el concreto no afectó la trabajabilidad hasta el porcentaje de reemplazo del 20%, lo cual es consistente con los hallazgos en la investigación de Hamad & Dawi, (2017). Cuando se realizó la mezcla con 40% de residuo, fue necesario adicionar una mayor cantidad de aditivo superplastificante. Sin embargo, el asentamiento determinado no cumplió con la especificación. Lo anterior, podría explicarse por dos factores: la forma y textura de los agregados reciclados y la posibilidad de que el material absorbiera parte del agua de mezcla, debido a un posible incremento de la absorción real frente a la determinada en el ítem 3.3.4. Más investigaciones son necesarias para evaluar el efecto del ARC en la trabajabilidad del CAR.

3.4.3 Estado endurecido

Posteriormente, y a las edades estipuladas, se determinaron las propiedades en estado endurecido asociadas al comportamiento mecánico como: la resistencia a la compresión, la resistencia a tracción indirecta, módulo de elasticidad, absorción total y absorción por capilaridad.

3.4.3.1 Resistencia a la compresión

Este ensayo fue ejecutado siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 673 (2010). La metodología consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen, ver Figura 42.

Figura 42. (a) Ensayo resistencia a la compresión. (b) Falla a compresión CAR. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.4.3.2 Resistencia a la tracción indirecta

Se ejecutó mediante la norma NTC 722 (2000), este método de ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en la longitud de un espécimen de concreto cilíndrico a una velocidad que se encuentra dentro del intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. Esta carga induce esfuerzos de tensión en el plano que contiene la carga aplicada y a esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente circundante a la carga aplicada. Ocurre falla por tensión, no por compresión, debido a que las áreas de aplicación de carga se encuentran en estado de compresión triaxial, lo que les permite soportar esfuerzos de compresión mayores que los indicados en el resultado del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial. Para este ensayo se usan listones de apoyo delgado, fabricado en madera contrachapada, de manera que la carga se aplique uniformemente en toda la longitud del cilindro, como se muestra en la Figura 43.

Figura 43. (a) Ensayo resistencia a la tracción. (b) Falla a tracción CAR. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

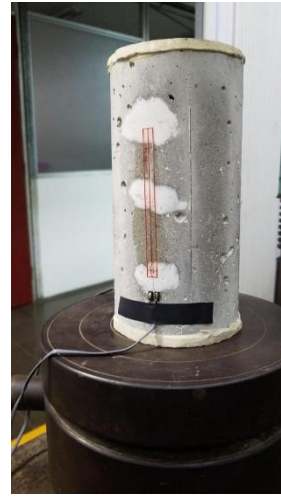
3.4.3.3 Módulo de elasticidad

Este ensayo se realizó mediante una variación a la norma NTC 4025 (2006), que proporciona una relación de esfuerzo a deformación y una relación de deformación lateral a longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y condiciones de curado establecidas. Los valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson, aplicables dentro del intervalo de esfuerzos de trabajo (0 % a 40 % de la resistencia última del concreto), para este caso se utilizó el 40% de la resistencia última de cada concreto con una madurez de 28 días, (Figura 44). Debido a que no se contaba con el equipo estipulado por la norma, fue necesaria la ejecución por medio de Strain Gauges adheridos a la superficie del concreto.

Figura 44. (a) Ensayo módulo de elasticidad. (b) Preparación espécimen de prueba. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

3.4.3.4 Velocidad de pulso ultrasónico

Se realizó mediante la norma NTC 4325 (1997), que cubija las especificaciones para el ensayo no destructivo de especímenes de concreto no reforzado mediante la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, ver Figura 45.

Figura 45. Ensayo velocidad de pulso ultrasónico. **Fuente:** Propia.



3.4.3.5 Propiedades asociadas a durabilidad

También se determinaron propiedades físicas, como la absorción total mediante la norma NTC 5653 (2008). Este método de ensayo cubre la determinación de la gravedad específica (densidad aparente), porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos (porosidad abierta) en el concreto endurecido. Este ensayo es útil para determinar la información necesaria para realizar conversiones entre masa y volumen del concreto. También se utiliza para determinar la conformidad con las especificaciones para el concreto y para mostrar variaciones de un lugar a otro dentro de una masa de concreto. El procedimiento se muestra en la Figura 46.

Figura 46. Ensayo absorción total (a) Masa seca en horno. (b) Masa saturada después de inmersión. (c) Masa saturada después de hervida. (d) Masa sumergida. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)



(c)



(d)

Y por último, la determinación de la absorción capilar se realizó mediante la norma NBR 9779 (1995). Esta Norma Internacional prescribe el método para determinar la absorción de agua a través del aumento capilar de mortero y concreto endurecido. En resumen, alcanzados los 28 días de edad, el concreto se seca al horno ($103\pm 5^{\circ}\text{C}$), para posteriormente ser sometido a una lámina de 5 mm de altura durante 72 horas, como se observa en la Figura 47. Se determina el incremento de la masa en el tiempo, así como la altura de penetración del agua por capilaridad.

Figura 47. (a) Ensayo absorción capilar. (b) Ascensión capilar. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

4 DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LA NORMA ACI 201.4

Para el desarrollo del proyecto se realizó la dosificación base de la mezcla de CAR según las recomendaciones del ACI 211.4R (2008). La cual es la guía para seleccionar proporciones para concreto de alta resistencia utilizando cemento Portland y otros materiales cementosos. De esta manera la metodología define los concretos de alta resistencia como aquellos cuya resistencia a la compresión especificada $f'c$ es mayor que 42 MPa (6000 psi).

El concreto base o de referencia será diseñado con una resistencia a la compresión de dosificación de $f'cr = 60$ MPa. Las propiedades de los materiales disponibles para la mezcla, los cuales son de buena calidad y cumplen con las normas NTC, se pueden observar en la Tabla 24.

Tabla 24. Datos básicos necesarios para realizar el diseño de mezcla. **Fuente:** Propia

Cemento		Ag. Grueso		Ag. Fino		Aditivo	
Gc	3,14	MF	6,69	MF	2,93	Gad	1,15
		TMN (“)	3/4	TMN (“)	No 4		
		Gsb sss	2,67	Gsb sss	2,82		
		%Abs	1,01	%Abs	2,35		
		MUss (kg/l)	1,44	MUss (kg/l)	1,62		
		MUsc (kg/l)	1,55	MUsc (kg/l)	1,78		

Para definir la dosificación de las mezclas se siguió el paso a paso del método ACI 211.4R (2008), el cual es descrito a continuación:

1. Selección de la Resistencia a la Compresión de la Dosificación ($f'cr$)

La resistencia promedio a la compresión requerida ($f'cr$), usada como base para la dosificación del concreto es de $f'cr = 60$ MPa.

2. Selección del asentamiento de la mezcla

A pesar de que un CAR puede ser producido exitosamente con aditivo superplastificante (AS), sin una medida inicial del slump, es recomendado un valor de 1 a 2", antes de adicionar el aditivo. Esto asegurará una adecuada cantidad de agua para la mezcla y permitirá que el aditivo sea efectivo. Se recomiendan valores de asentamiento, después del AS, de al menos 2", ver Tabla 25.

Tabla 25. Asentamiento recomendado para concreto con y sin Aditivos Reductores de Agua de Alto Rango (HRWRA) **Fuente:** (ACI 211.4R-08, 2008)

Concreto hecho usando HRWRA*	
Asentamiento antes de agregar HRWRA†	1" a 2"
Concreto hecho sin HRWRA	
Asentamiento	2" a 4"

*Ajustar el asentamiento apropiado en el campo mediante la adición de HRWRA

†HRWRA: Aditivos Reductores de Agua de Alto Rango

Antes de aditivo Superplastificante = 2 Pulg ≈ 5,1 cm

Después de aditivo Superplastificante = 4 Pulg ≈ 10,2 cm

3. Selección del tamaño máximo del agregado grueso

Basados en la resistencia $f'_{cr} = 60 \text{ MPa} \approx 8705 \text{ Psi}$, el TM del agregado grueso es dado en la Tabla 26.

Tabla 26. Tamaño máximo sugerido de agregado grueso. **Fuente:** (ACI 211.4R-08, 2008)

Resistencia requerida del concreto, psi	Tamaño máximo sugerido de agregado grueso, (pulgada).
<9000	3/4 a 1
>9000	3/8 a 1/2*

*Cuando se usa HRWRA y agregado grueso seleccionado, se pueden lograr resistencias a la compresión del concreto en el rango de 9000 a 12000 psi usando agregados gruesos de tamaño máximo nominal mayor de lo recomendado de hasta 1 pulgada.

TM de Ag. Grueso es = 1"

TMN de Ag. Grueso es = 3/4"

4. Selección del contenido óptimo de agregado grueso

Se calcula en función del **TMN**. Los valores dados en la Tabla 27 se recomiendan para su uso con agregados finos con módulos de finura entre **2,5 - 3,2**

Tabla 27. Volumen recomendado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. **Fuente:** (ACI 211.4R-08, 2008)

Contenido óptimo de agregados gruesos para tamaños máximos nominales de agregados para ser utilizados con agregados finos con un módulo de finura de 2,5 a 3,2				
Tamaño máximo nominal, pulgada	3/8	1/2	3/4	1
Volumen fraccional* de agregado grueso con varilla seca al horno (VCA)	0,65	0,68	0,72	0,75

*Los volúmenes se basan en agregados de condición de varillas secas al horno como se describe en ASTM C29/C29M para la unidad de masa o densidad aparente de agregados

La masa de agregado grueso se obtiene:

$$G_1 = VCA * MU_{sc}$$

$$G_{1ss} = G_1 * (1 + Abs/100)$$

Cálculos:

Módulo de Finura Arena (MF) = 2,9 (Tabla 24)

Masa Unitaria Compacta (MU_{sc}) = 1.554 kg/m³ (Tabla 24)

% Absorción = 1,0 (Tabla 24)

Volumen Compacto de agregado (VCA) = 0,72 (Tabla 27)

$$G_1 = 1.119 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{1ss} = \mathbf{1.130 \text{ kg/m}^3}$$

5. Estimación del agua de mezcla y porcentaje del aire atrapado

El agua requerida para producir el asentamiento depende de: TM del agregado grueso, la forma de las partículas, gradación del agregado, cantidad de cemento, adiciones y aditivos usados.

Debido a que la forma de la partícula y la textura de la superficie de un agregado fino pueden influir significativamente en su contenido de vacíos, los requerimientos de agua de mezcla pueden ser diferentes de los valores dados, ver Tabla 28, que fueron calculados para un contenido de vacíos igual a 35%.

El contenido de vacíos de un agregado fino puede determinarse usando la ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = 1 - \frac{M}{D} \times 100$$

M: Masa unitaria seca

D: Densidad aparente seca

Si el contenido de vacíos del Ag. Fino es diferente de 35%, es necesario ajustar el agua de mezcla en 4,8 kg/m³ por cada 1% de diferencia en índice de vacíos.

Tabla 28. Primera estimación del requerimiento de agua de mezcla y contenido de aire del concreto recién mezclado basado en el uso de agregado fino con 35% vacíos. **Fuente:** (ACI 211.4R-08, 2008)

Asentamiento, pulgada.	Mezcla de agua, lb/yd ³ *			
	Tamaño máximo de agregado grueso, (pulgada).			
	3/8	1/2	3/4	1
1 a 2	310	295	285	280
2 a 3	320	310	295	290
3 a 4	330	320	305	300
Contenido de aire atrapado	3 (2,5)†	2,5 (2,0)†	2 (1,5)†	1,5 (1,0)†

*Los valores dados deben ajustarse para agregados finos con huecos distintos al 35% usando la Eq.(6-3)

†Mezclas hechas usando HRWRA

Cálculos:

$$1 \text{ lb/yd}^3 = 0,6 \text{ kg/m}^3$$

$$285 \text{ lb/yd}^3 \text{ (Tabla 28)} = 169,0 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Contenido de agua (W)} = 169 \text{ kg/m}^3$$

$$\% \text{ Aire} = 1,5 \text{ (Tabla 28)}$$

Masa Unitaria Suelta (MUsc) = 1,62 kg/l (Tabla 24)

Densidad Aparente Seca (Gsbseca) = 2,82 (Tabla 24)

$$\% \text{ Vacíos} = 1 - \frac{M}{D} \times 100$$

% Vacíos Ag. Fino = 42,6

% Vacíos > 35 **CORREGIR**

Factor de corrección = 1% \approx 4,8 kg/m³

Valor excedente % de vacíos = 7,6 \approx 36,5 kg/m³

Contenido de agua Corregido (W) = 205 kg

% Aire = 1,5 (Tabla 28)

6. Determinación de la relación agua/cemento (a/c)

En la Tabla 29 se muestran los valores máximos recomendados para la relación agua/cemento, en función del TMN para alcanzar diferentes resistencias a compresión en 28 o 56 días.

Tabla 29. Máxima relación a/c recomendada para Concretos de Alta Resistencia. **Fuente:** (ACI 211.4R-08, 2008)

Resistencia media a la compresión requerida f'_{cr} *, psi		a/c							
		Tamaño máximo de agregado grueso, (pulgada).							
		3/8		1/2		3/4		1	
		Con HRWRA	Sin HRWRA	Con HRWRA	Sin HRWRA	Con HRWRA	Sin HRWRA	Con HRWRA	Sin HRWRA
7000	28 días	0,50	0,42	0,48	0,41	0,45	0,40	0,43	0,39
	56 días	0,55	0,46	0,52	0,45	0,48	0,44	0,46	0,43
8000	28 días	0,44	0,35	0,42	0,34	0,40	0,33	0,38	0,33
	56 días	0,48	0,38	0,45	0,37	0,42	0,36	0,40	0,35
9000	28 días	0,38	0,30	0,36	0,29	0,35	0,29	0,34	0,28
	56 días	0,42	0,33	0,39	0,32	0,37	0,31	0,36	0,30
10000	28 días	0,33	0,26	0,32	0,26	0,31	0,25	0,30	0,25
	56 días	0,37	0,29	0,35	0,28	0,33	0,27	0,32	0,26
11000	28 días	0,30	-	0,29	-	0,27	-	0,27	-
	56 días	0,33	-	0,31	-	0,29	-	0,29	-
12000	28 días	0,27	-	0,26	-	0,25	-	0,25	-
	56 días	0,30	-	0,28	-	0,27	-	0,26	-

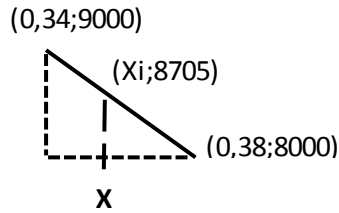
Cálculos:

$$f'_{cr} = 60 \text{ Mpa}$$

$$f'_{cr} = 8705 \text{ Psi}$$

Resistencia a 28 días y relación a/c según la Tabla 29 (Interpolación de datos).

- 8000 psi → 0,4 a/c
- 8705 psi → Xi a/c
- 9000 psi → 0,35 a/c



$$X_i = 0,37 \text{ a/c}$$

La relación a/c a 28 días es = 0,37

7. Cálculo del contenido de material cementicio

El peso requerido por m³ de concreto puede ser calculado por la división de la cantidad de agua entre la relación a/c.

Cálculos:

$$W = 205 \text{ kg}$$

$$a/c = 0,37$$

$$c = \frac{w}{a/c}$$

$$c = 563 \text{ kg}$$

8. Cálculo del contenido de agregado fino

Después de determinar las masas por metro cúbico de concreto de: agregado grueso, cemento, agua y porcentaje de aire, el contenido de agregado fino puede ser calculado utilizando el método de volumen absoluto.

Cálculos:

$$V_w = 205$$

$$G_{1SSS} = 1.130 \text{ kg}$$

$$\gamma G_{1SSS} = 2,67 \text{ (Tabla 24)}$$

$$c = 563 \text{ kg}$$

$$\gamma c = 3,14 \text{ kg/l (Tabla 24)}$$

$$V. \text{ Aire} = 15 \text{ l}$$

$$\gamma A_{fSSS} = 2,82 \text{ kg/l (Tabla 24)}$$

$$\frac{mA_f}{\gamma A_{fSSS}} = 1000 \text{ L} - \left(V_w + \frac{G_{1SSS}}{\gamma G_{1SSS}} + \frac{mc}{\gamma c} + V. \text{ Aire} \right)$$

$$1000 \text{ L} = V_w + \frac{G_{1SSS}}{\gamma G_{1SSS}} + \frac{mc}{\gamma c} + \frac{mA_f}{\gamma A_{fSSS}} + V. \text{ Aire}$$

$$\frac{mA_f}{\gamma A_{fSSS}} = 196,5$$

$$mA_f = 554,5 \text{ kg}$$

9. Dosificación de la mezcla básica sin otros materiales cementicios

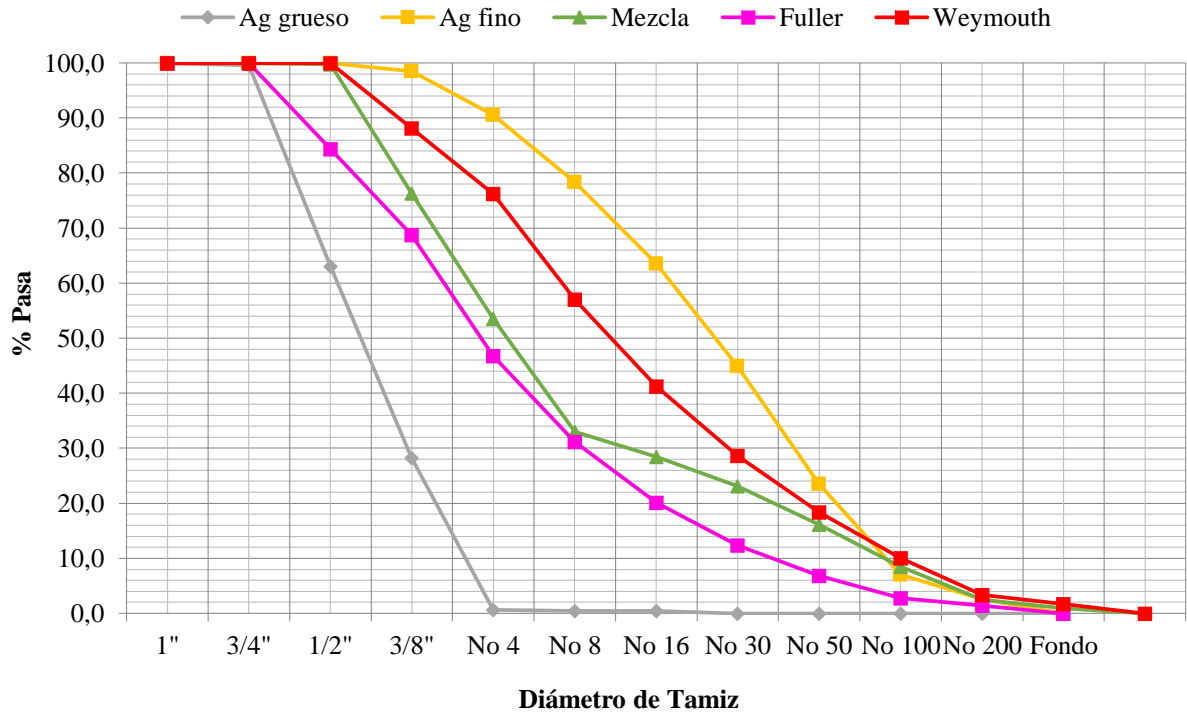
La dosificación inicial de la mezcla básica saturada superficialmente seca (SSS) sin otros materiales cementicios se puede observar en la Tabla 30.

Tabla 30. Dosificación inicial de la mezcla básica saturada superficialmente seca. **Fuente:** Propia.

Dosificación Inicial SSS				
	Agua	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso
kg/m³	205	563	554	1130
Tecnológica	0,37	1,0	0,98	2,0
Volumen en l	205	179	197	404

Determinada la dosificación inicial de la mezcla básica obtenida por el método del ACI, se comprobó la granulometría de la mezcla de los agregados al compararla con las curvas teóricas de Fuller y Weymouth, ver Figura 48.

Figura 48. Relación de mezclas de agregado fino y grueso para la dosificación obtenida. **Fuente:** Propia.



Al verificar el comportamiento de la mezcla de los agregados finos y grueso en comparación con las curvas teóricas de Fuller y Weymouth, se realizan unos pequeños ajustes para lograr la compacidad ideal de la dosificación, de esta manera en la Tabla 31 se puede observar la dosificación final de la mezcla básica de referencia en estado SSS.

Tabla 31. Dosificación final de la mezcla básica de referencia saturada superficialmente seca. **Fuente:** Propia.

Dosificación Final SSS				
	Agua	Cemento	Ag. Fino	Ag. Grueso
kg/m³	201	550	610	1100
Tecnológica	0,37	1,0	1,1	2,0
Volumen en l	201	175	216	393

10. Primera mezcla de prueba. Ajuste por humedad de los agregados

Se elabora la primera mezcla de prueba con la dosificación obtenida. Antes se debe realizar el ajuste por humedad de los agregados, dado que la dosificación está expresada en masa saturada superficialmente seca, esta corrección consiste en calcular nuevas cantidades de agua, agregado grueso y agregado fino según la humedad que posean estos últimos.

De esta manera se toma una muestra de agregado fino y grueso, se pesan los recipientes y se colocan en el horno hasta que el material se encuentre totalmente seco, se pesan las muestras nuevamente y se calcula la humedad total obtenida, este proceso se debe repetir en cada mezcla a realizar y se deben de hacer las correcciones requeridas de las cantidades de materiales de acuerdo a la humedad, las ecuaciones para calcular las humedades se muestran a continuación:

$$\text{Humedad total (\%)} = \frac{\text{Peso material humedo} - \text{Peso material seco}}{\text{Peso material seco}} \times 100$$

$$\text{Humedad superficial (\%)} = \text{Humedad total} - \text{Absorción}$$

Las humedades y la absorción calculada en el laboratorio, previo a la elaboración de la mezcla de concreto por corrección de asentamiento se pueden observar en la Tabla 32.

Tabla 32. Humedades y absorción calculada en laboratorio. **Fuente:** Propia.

	Humedad total (%)	Absorción (%)	Humedad superficial (%)
Agregado Fino	15,8	2,4	13,5
Agregado Grueso	1,7	1,0	0,7

Una vez obtenidas las humedades reales de los agregados a utilizar para la mezcla se deben hacer las correcciones pertinentes a las masas de los agregados y la cantidad de agua. Dado que la dosificación esta expresada en SSS la dosificación corregida debe incluir la humedad superficial calculada. De esta manera la masa de los agregados y el contenido de agua se calcularían para cada una de las mezclas a realizar en el proyecto con las siguientes ecuaciones:

Dosificación SSS

Dosificación Humedad superficial (HS)

$$mH_2O$$



$$mH_2O - Af - Ag$$

$$mAf$$



$$mAf \times \left(1 + \frac{HS}{100}\right)$$

$$mAg$$



$$mAg \times \left(1 + \frac{HS}{100}\right)$$

Donde;

$$Af = mAf_{HS} - mAf_{SSS}$$

$$Ag = mAg_{HS} - mAg_{SSS}$$

11. Ajustes a las mezclas de prueba

Con la dosificación final se elabora la primera mezcla de prueba (ver Figura 49 y 51), la cantidad de concreto para estos ensayos fue de 0,012 m³. El objetivo es identificar la cantidad de AP a utilizar para cumplir la trabajabilidad del concreto, por medio del ensayo de asentamiento (NTC 396, 1992) para un valor de 10 ± 2 cm (Figura 50). Posteriormente, se procede a la preparación y curado de los especímenes de ensayo, según la NTC 1377 (2010). Las cantidades obtenidas

después de la corrección por humedad de los agregados se pueden verificar la Tabla 33. Finalmente, se determinó la resistencia de diseño a 28 días de $f'_{cr}=60$ MPa.

Tabla 33. Dosificación empleada para la mezcla de concreto por control de asentamiento. **Fuente:** Propia.

Material	Dosificación para 1 m ³ SSS (kg/m ³)	Dosificación para 12 l SSS (kg)	Cantidad corregida por humedad superficial (kg)
Agua	201	2,4	1,3
Cemento	550	6,6	6,6
Ag. Fino	610	7,3	8,3
Ag. Grueso	1100	13,2	13,3
ARC (0%)	0	0	0
Aditivo (0,76%)	4	0,05	0,05

SSS = Saturado superficialmente seco

Figura 49. (a) y (b) Preparación de la mezcla de concreto, corrección por asentamiento. **Fuente:** Propia.



(a)



(b)

Figura 50. (a) y (b) Asentamiento de la mezcla de concreto con aditivo superplastificante. **Fuente:** Propia.



Figura 51. (a) Elaboración de los cilindros de prueba. (b) Curado de los especímenes de ensayo para el concreto de control por asentamiento. **Fuente:** Propia.



Los resultados obtenidos de la mezcla de control de asentamiento se muestran en la Tabla 34, para un contenido de AS del 0,76% en relación al peso del cemento y las cantidades de material, especificadas en la Tabla 33.

Tabla 34. Resultados del concreto de corrección por asentamiento. **Fuente:** Propia.

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)		Asentamiento (cm)
	7 días	28 días	
CA	44,8	60,6	14

CA = Control por asentamiento

Dado que el asentamiento no se encuentra dentro del intervalo deseado, el contenido de agua o la dosis de aditivo debe ser ajustado. Para mantener la relación a/c se optó por reducir la cantidad de aditivo a un 0,562% en relación con el peso del cemento, con el fin de cumplir con el asentamiento calculado después del AS en la dosificación (10 ± 2 cm).

Con respecto a la resistencia a compresión del concreto a 28 días se puede observar que la dosificación empleada fue correcta y está cumpliendo con los parámetros calculados, de esta manera se estandariza las medidas a emplear con las diferentes mezclas del proyecto, conservando la relación a/c y las cantidades calculadas en la dosificación.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados de cuatro mezclas de concreto de alta resistencia (Tabla 35), para las propiedades en estado endurecido asociadas al comportamiento mecánico, como la resistencia a compresión, tracción indirecta, módulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasónico. De igual manera, se analizaron las propiedades físicas asociadas a durabilidad como la absorción total y absorción capilar. Para cada una de estas propiedades se evaluó el efecto del reemplazo de ARC por agregados naturales en los CAR.

Tabla 35. Mezclas de concreto de altas resistencias estudiadas. **Fuente:** Propia.

Nomenclatura	Descripción
CB	Mezcla de concreto base o referencia $f'c = 60\text{MPa}$.
RC10	Mezcla con remplazo parcial del 10% de agregados gruesos naturales por ARC
RC20	Mezcla con remplazo parcial del 20% de agregados gruesos naturales por ARC
RC40	Mezcla con remplazo parcial del 40% de agregados gruesos naturales por ARC

Mediante el uso de herramientas estadísticas que permitieron demostrar la validez de los datos adquiridos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los resultados generales para cada una de las mezclas evaluadas. Esta herramienta consiste en probar la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, evaluando la importancia de un factor al comparar las medias de las variables de respuesta en los diferentes grupos muestrales. La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa (H_1) establece que al menos una es diferente.

Por último se realiza una prueba de observación extrema de muestra única bajo el criterio Dixon siguiendo la norma ASTM E178 - 08 (2015). Con un nivel de significancia del 95% para 3 y 4 muestras en las diferentes variables resultantes, con el fin de analizar los valores atípicos de una

población diferente a la de los otros valores de la muestra y descartarlos si es necesario. Una vez hecho estos análisis se procedió a calcular las variables de estudio.

5.1 Resistencia a la Compresión

Para esta propiedad, se evaluaron para cada mezcla 4 cilindros en las edades de 7 y 28 días y 3 especímenes a los 56 días, de acuerdo a la metodología anteriormente descrita en el capítulo 3. En la Tabla 36 se resumen los cálculos correspondientes al análisis de varianza de un factor (ANOVA) de los resultados generales de la resistencia a la compresión.

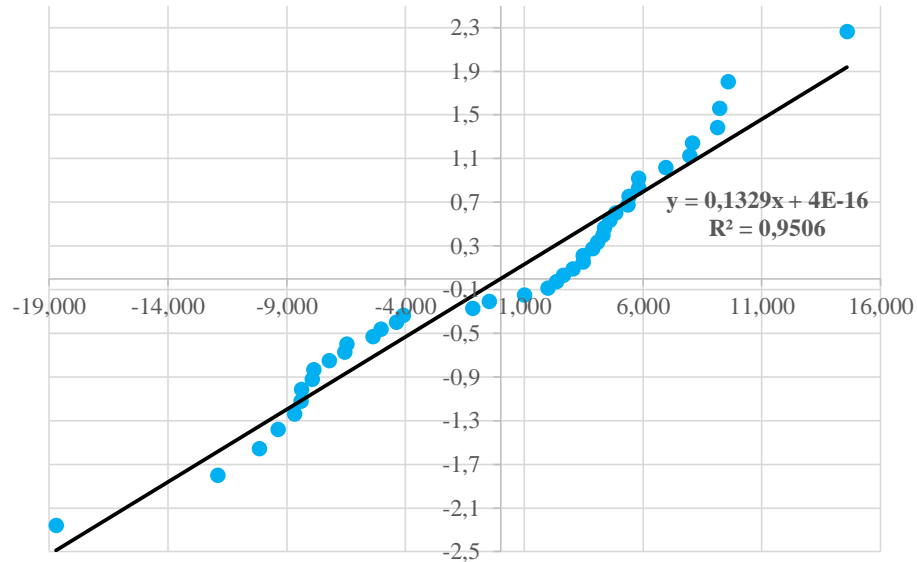
Tabla 36. Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión. **Fuente:** Propia.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3458,89	3	1152,96	19,97	6,16E-08	2,85
Dentro de los grupos	2193,47	38	57,72			
Total	5652,36	41				

F > F crítico; Entonces se rechaza la Ho (Hipótesis Nula) de que todas las medias poblacionales son iguales

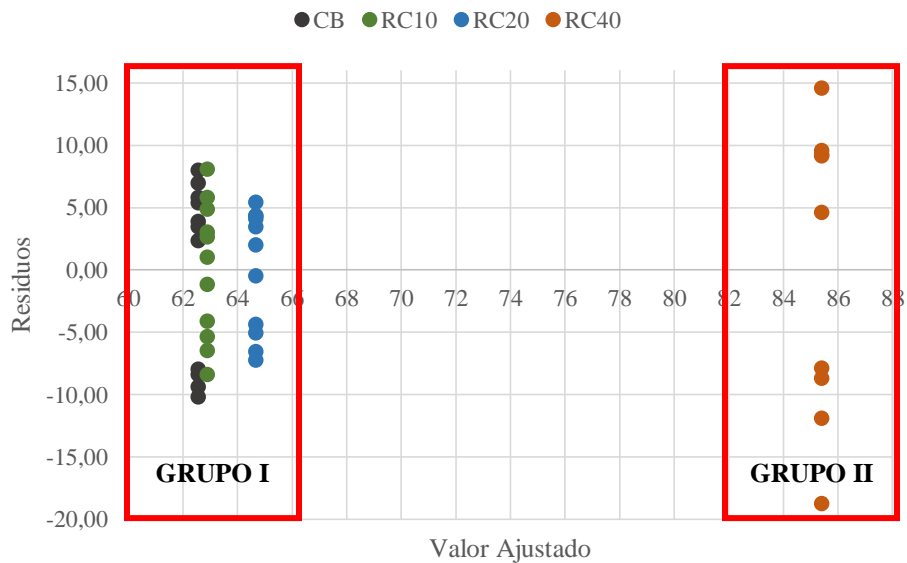
En la Figura 52 se muestra la distribución normal de los resultados de resistencia a compresión con el fin de comprobar la hipótesis nula de que la muestra ha sido extraída de una población con distribución de probabilidad normal.

Figura 52. Supuesto de normalidad de los resultados de resistencia a compresión. **Fuente:** Propia.



En la Figura 53 se representa la igualdad de las varianzas para los resultados de resistencia a compresión calculada para cada grupo muestral, de esta manera se pone a prueba la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales no son iguales.

Figura 53. Supuesto de igualdad de varianza de los resultados de resistencia a compresión. **Fuente:** Propia.



En la Tabla 37 se muestran los resultados promedio de resistencia a compresión de las muestras cilíndricas de cada mezcla a la edad de 7, 28 y 56 días.

Tabla 37. Resultados promedio de resistencia a compresión uniaxial de los concretos. **Fuente:** Propia.

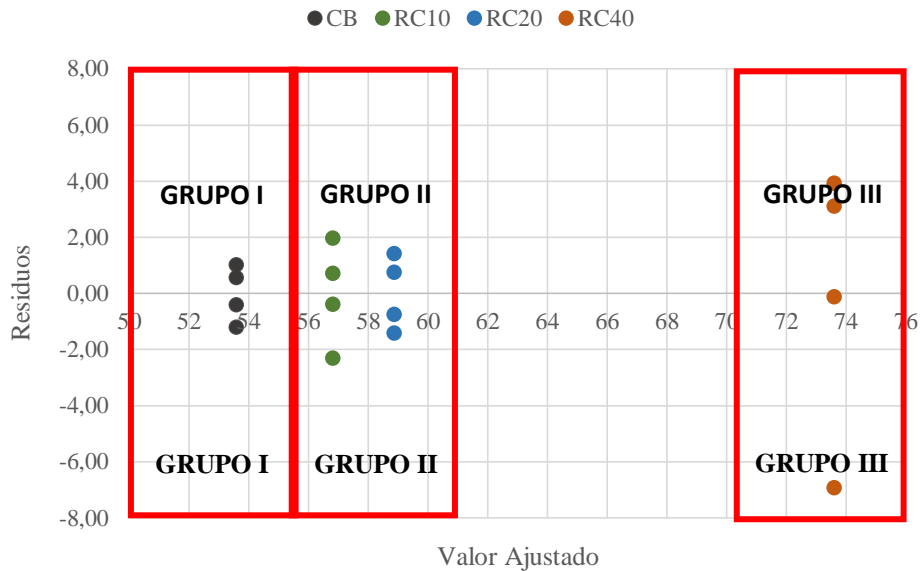
MEZCLA	7 DÍAS ESFUERZO (MPa)	28 DÍAS ESFUERZO (MPa)	56 DÍAS ESFUERZO (MPa)
CB	53,59	66,72	68,94
RC10	56,82	64,28	69,37
RC20	58,87	66,58	68,99
RC40	75,92	94,71	94,99

Del análisis de varianza (Figura 53) se puede concluir que la incorporación de hasta el 20% de ARC en el concreto no tuvo un efecto significativo en la resistencia a la compresión. Sin embargo, con el reemplazo del 40% de agregado reciclado la resistencia se incrementó, con respecto al concreto de referencia, un 40% en promedio para todas las edades.

Este comportamiento podría explicarse por la presencia de pasta de cemento de alta resistencia adherida al agregado reciclado, pues es probable que aún posea cemento anhidro, que al hidratarse aumente la adherencia entre la pasta y el ARC y aporte de manera favorable al desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto. Adicionalmente, el agregado reciclado presentó un elevado desempeño en ensayos que podrían asociarse a propiedades mecánicas, como el desgaste y la solidez. Lo anterior toma importancia, pues la textura y forma del agregado pueden aportar a un mejor comportamiento mecánico del CAR. Esto también se indicó en el estudio de González & Etxeberria (2013), pues la alta rugosidad de la superficie de los agregados reciclados conduce a una buena unión entre la pasta de cemento y los agregados, mejorando así las propiedades mecánicas de esta región y proporcionando a las mezclas con ARC mayor resistencia a la compresión.

En la Figura 54 se representa la igualdad de las varianzas para los resultados de resistencia a compresión a los 7 días de edad, calculada para cada grupo muestral.

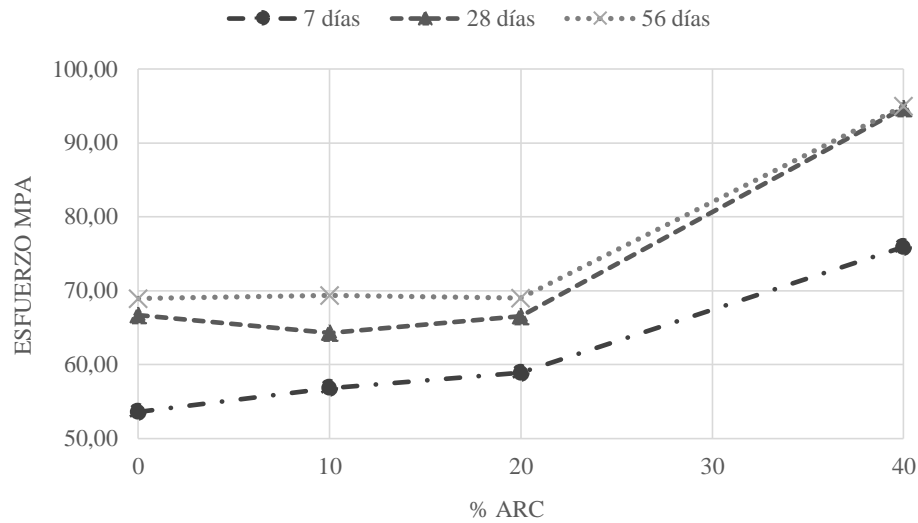
Figura 54. Supuesto de igualdad de varianzas de los resultados de resistencia a compresión a los 7 días de edad. **Fuente:** Propia.



Es importante aclarar, que cuando se realizó el análisis de varianza en cada edad, sólo a los 7 días se presentaron tres grupos distintitos en los concretos (Figura 54). Por lo tanto, las mezclas con adición de 10, 20 y 40 % de ARC mostraron aumentos significativos de la resistencia del orden de 6%, 10% y 42%, respectivamente. Se concluye que la incorporación de ARC tuvo un efecto positivo en la resistencia a la compresión, principalmente en las edades iniciales. González & Etxeberria (2013), obtuvieron una mayor resistencia a la compresión que el concreto de referencia después de 24 h, la capacidad de absorción restante del ARC parcialmente saturado podría reducir la relación a/c en la zona de transición, mejorando su resistencia en la hidratación temprana. Lo anterior, se relaciona con el comportamiento presentado en esta propiedad.

La Figura 55 muestra la evolución de la resistencia a la compresión promedio del concreto de referencia y las diferentes adiciones de ARC, para las tres edades de análisis.

Figura 55. Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos. **Fuente:** Propia.



Como era esperado, se observó una tendencia ascendente de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el tiempo de curado. La mezcla de referencia mostró una resistencia a la compresión igual a 53,59 MPa, 66,72 MPa y 68,94 MPa a los 7, 28 y 56 días, respectivamente. Hubo un crecimiento aproximado del 25% de 7 a 28 días y del 3% de 28 a 56 días, observándose en el resto de las mezclas un comportamiento similar.

5.2 Resistencia a la Tracción Indirecta

El comportamiento de esta propiedad, se evaluó analizando 3 cilindros de prueba por cada edad, distribuidos entre 7 y 28 días para cada mezcla (Tabla 35), de acuerdo a la metodología anteriormente descrita en el capítulo 3. Los cálculos correspondientes al análisis de varianza de un factor (ANOVA) se resumen en la Tabla 38, que comprende los resultados generales de resistencia a tracción.

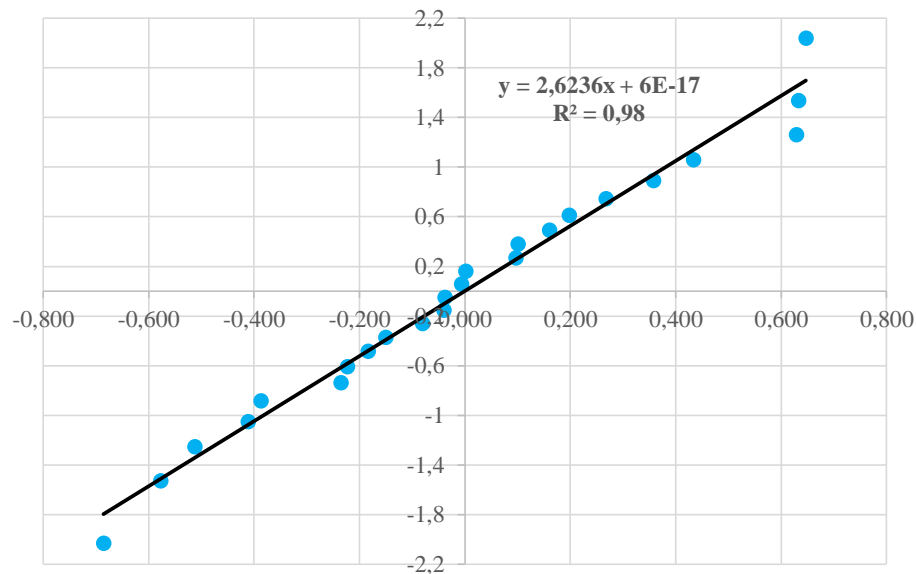
Tabla 38. Análisis de varianza de los resultados de resistencia a tracción. **Fuente:** Propia.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,76	3	0,59	3,63	0,030674	3,10
Dentro de los grupos	3,24	20	0,16			
Total	5,01	23				

F > F crítico; Entonces se rechaza la Ho (Hipótesis Nula) de que todas las medias poblacionales son iguales

Para comprobar la hipótesis nula de que la muestra ha sido extraída de una población con distribución de probabilidad normal se puede observar en la Figura 56 el supuesto de normalidad de los resultados de resistencia a tracción.

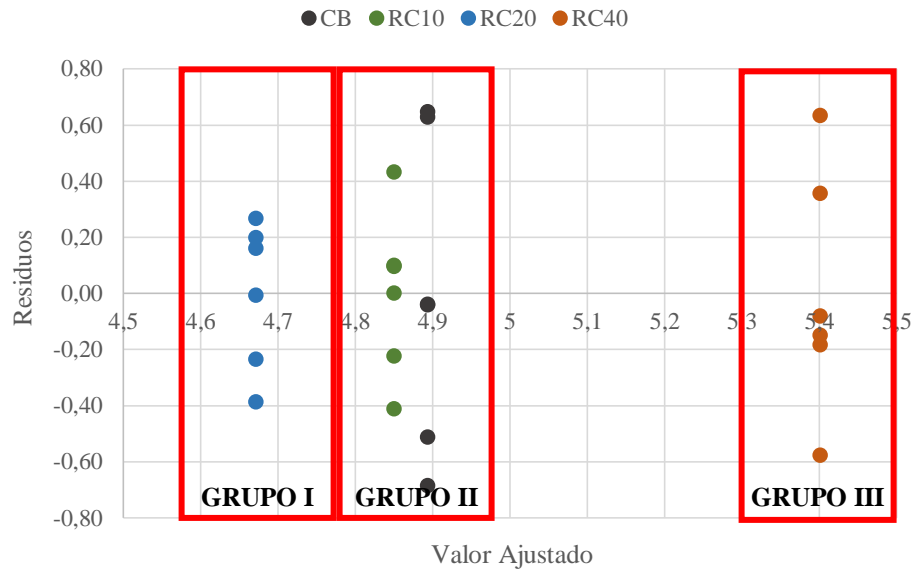
Figura 56. Supuesto de normalidad de los resultados de resistencia a tracción. **Fuente:** Propia.



Al evaluar la igualdad de las varianzas de los resultados de la resistencia a tracción se pone a prueba la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales no son iguales y se puede comprobar

en la Figura 57, donde se observa la formación de tres grupos de datos que son estadísticamente distintos.

Figura 57. Supuesto de igualdad de varianza de los resultados de resistencia a tracción. **Fuente:** Propia.



La Tabla 39 muestra los valores promedio de resistencia a tracción de las muestras cilíndricas de cada mezcla a la edad de 7 y 28 días.

Tabla 39. Resultados promedio de resistencia a tracción indirecta de los concretos. **Fuente:** Propia.

MEZCLA	7 DÍAS	28 DÍAS
	ESFUERZO (MPa)	ESFUERZO (MPa)
CB	4,48	5,53
RC10	4,70	5,03
RC20	4,89	4,65
RC40	5,12	5,68

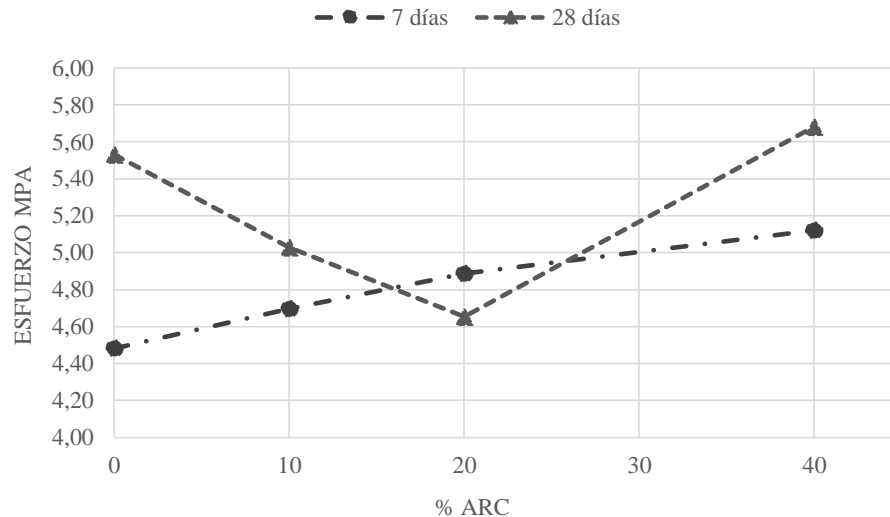
Si se analiza el comportamiento a la edad de 7 días se concluye que a medida que se incorpora el 10, 20 y 40 % de ARC, aumenta la resistencia de los concretos, mostraron un aumento en la resistencia del orden de 5%, 9% y 14%, respectivamente. Esto podría explicarse debido a la

hidratación en las edades iniciales de la pasta de cemento de alta resistencia adherida al agregado reciclado y está en congruencia con lo encontrado en la resistencia a la compresión.

En contraste, a los 28 días hubo un comportamiento inverso, pues el concreto base obtuvo resistencias superiores a RC10 y RC20, pero inferiores al RC40, apenas un 2,7%. Este comportamiento fue similar a lo encontrado en la investigación de González & Etxeberria (2013) y Hamad & Dawi (2017), donde la cantidad de uso y la calidad del ARC tuvieron poca influencia en la resistencia a la tracción al compararlo con los resultados del concreto de referencia.

Lo anterior se puede observar con más detalle en la Figura 58, que muestra la evolución de la resistencia a la tracción promedio del concreto de referencia y las diferentes adiciones de ARC, para las dos edades de estudio.

Figura 58. Evolución de la resistencia a tracción indirecta de los concretos. **Fuente:** Propia.



Como se esperaba, la edad influyó significativamente en los valores de resistencia a la tracción de las mezclas, solamente en el concreto RC20 no hubo una mejora en la resistencia con el tiempo. Es de resaltar, que el concreto base tuvo el mayor incremento de la resistencia en el tiempo, 23,4%

a la edad de 28 días. Lo que muestra que la evolución de las propiedades mecánicas del concreto sin ARC se da a más largo plazo comparada con los CAR con agregados reciclados.

5.3 Módulo de Elasticidad

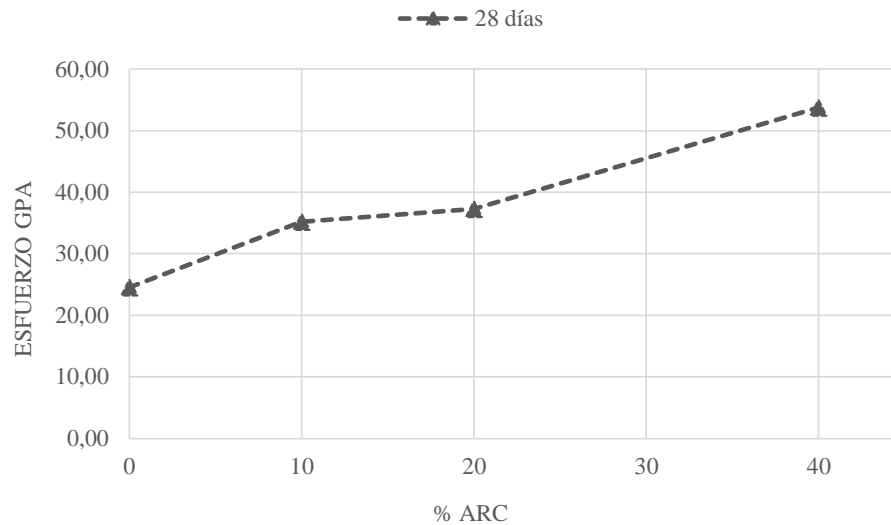
Para el módulo de elasticidad, se evaluaron 2 cilindros a la edad de 28 días de cada mezcla, de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo 3. Cabe aclarar que, debido al número limitado de ensayos, no fue realizado el análisis estadístico de los datos. A continuación, en la Tabla 40 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de esta propiedad.

Tabla 40. Resultados promedio del módulo de elasticidad de los concretos. **Fuente:** Propia.

MEZCLA	28 DÍAS MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
CB	24,53
RC10	35,23
RC20	37,31
RC40	53,74

En la Figura 59 se puede observar la evolución del módulo de elasticidad del concreto de referencia y con diferentes adiciones de ARC a los 28 días de edad.

Figura 59. Evolución del módulo de elasticidad de los concretos. **Fuente:** Propia.



Se observó una tendencia ascendente del módulo de elasticidad a medida que aumenta el contenido de agregado reciclado, pues las mezclas con adición de 10, 20 y 40 % de ARC mostraron un incremento del orden de 44%, 52% y 119%, respectivamente. Es importante anotar, que en las investigaciones de González & Etxeberria (2013) y Hamad & Dawi (2017) este comportamiento no fue tan marcado.

Dado que el módulo de elasticidad del concreto es una propiedad que depende en gran medida del agregado grueso utilizado y de las características de la zona de transición entre la pasta de cemento hidratado y el agregado (Metha & Monteiro, 2014), este comportamiento llama la atención, pues indicaría que efectivamente el ARC posee propiedades que lo viabilizan como un material de excelente calidad para la fabricación de CAR, asociado a la mejora de la textura superficial del agregado y por tanto, al incremento de la adherencia entre los materiales constituyentes.

5.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para determinar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico del concreto en función del tiempo, se analizaron catorce especímenes en total para cada mezcla, ocho de la resistencia a la compresión (7 y 28 días) y seis de la resistencia a tracción indirecta (7 y 28 días), de acuerdo con la metodología anteriormente descrita en el capítulo 3. En la Tabla 41 se muestran los resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros de ensayo a compresión para las mezclas a la edad de 7 y 28 días.

Tabla 41. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los concretos. **Fuente:** Propia.

MEZCLA	7 DÍAS VELOCIDAD (m/s)	28 DÍAS VELOCIDAD (m/s)
CB	4.374	4.697
RC10	4.533	4.627
RC20	4.475	4.643
RC40	4.511	4.642

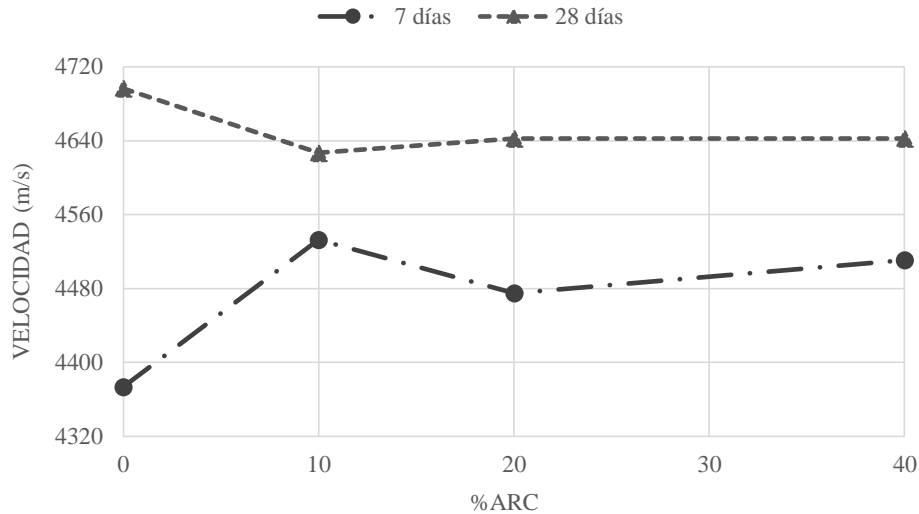
Al analizar los valores obtenidos en el ensayo, se puede concluir que, según lo estipulado por Neville (1997) en la Tabla 42, los concretos a los 7 días pueden clasificarse como de buena calidad. Si se analizan los valores a los 28 días se clasifican como excelentes, lo cual era esperado pues se trabajó con CAR. Estos resultados son consistentes en la investigación de González & Etxeberria (2013).

Tabla 42. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los concretos. **Fuente:** (Neville, 1997)

VELOCIDAD (m/s)	CALIDAD DEL CONCRETO
> 4.500	Excelente
3.500 – 4.500	Bueno
3.000 – 3.500	Regular
2.000 – 3.000	Malo
< 2.000	Muy Malo

La Figura 60 muestra la evolución promedio de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros ensayados para las edades de estudio.

Figura 60. Evolución de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros de ensayo para las edades de estudio. **Fuente:** Propia.



Claramente, a medida que pasa el tiempo la velocidad de pulso ultrasónico aumenta. Esto está asociado a la evolución del grado de hidratación en el tiempo, que genera mayor cantidad de productos hidratados y disminuye la porosidad del material.

No obstante, se observa un comportamiento distinto en el concreto base, pues el incremento marcado de la velocidad de 7 a 28 días es del 7,4%. Ya en los CAR que contienen agregado reciclado, ese aumento fue menor. Lo anterior, muestra de nuevo que el ARC tiene mayor efecto en las edades iniciales de la hidratación. Como referencia, en la investigación de González & Etxeberria (2013), el concreto sin incorporación de ARC fue el que mostró mejores resultados en esta propiedad.

Adicionalmente, se observa una disminución del valor de la velocidad de onda a los 28 días para los concretos con ARC, cuando se comparan con el concreto base. Esto podría explicarse

debido a que el agregado reciclado posee una porosidad mayor (5,4%) que el agregado grueso natural (1,0%), lo que influye directamente en la heterogeneidad del concreto.

5.5 Absorción Total

La ejecución de este ensayo siguió la metodología descrita en el capítulo 3 y fue realizado en 3 muestras cilíndricas a los 28 días de edad. Los resultados individuales de la absorción total se presentan en la Tabla 43, la cual muestra los valores promedio de las pruebas de absorción por inmersión total, junto con el % de vacíos y la masa específica en los cilindros de ensayo para cada una de las mezclas de estudio.

Tabla 43. Resultados promedio de la prueba de absorción por inmersión total de los concretos a 28 días. **Fuente:** Propia.

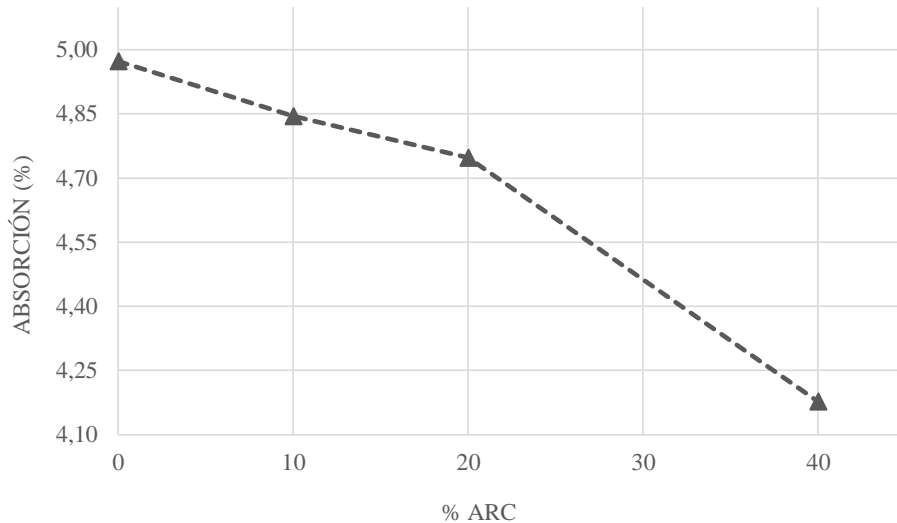
ABSORCIÓN DE AGUA TOTAL 28 DÍAS								
MEZCLA	% ABS x INM.	%ABS x INM. Y HER.	CLASI. CONCRET.	ρ SECA (g/cm ³)	ρ DES. INM. (g/cm ³)	ρ DES. INM. Y HER. (g/cm ³)	ρ APARENTE (g/cm ³)	% VACIOS
CB	4,97	4,78	<u>Conven.</u>	2,37	2,49	2,48	2,67	11,34
RC10	4,84	4,51	<u>Conven.</u>	2,40	2,51	2,51	2,69	10,82
RC20	4,75	4,43	<u>Conven.</u>	2,38	2,49	2,48	2,66	10,54
RC40	4,18	3,98	<u>Alto desem.</u>	2,42	2,53	2,52	2,68	9,64

ρ = Densidad

La mezcla de referencia mostró una absorción igual a 4,97%, este valor fue disminuyendo a medida que se adicionó el ARC. Este comportamiento está relacionado con el porcentaje de vacíos de los concretos. De acuerdo con la norma NBR 9778 (1987), la clasificación del concreto según el valor de absorción obtenido para las muestras CB, RC10 y RC20 fue de un concreto convencional. En relación con la muestra RC40 que contiene 40% de ARC, presenta un comportamiento ideal de impermeabilización, por lo que se clasifica como un concreto de alto desempeño (CAD).

En la Figura 61 se observa la evolución de la absorción por inmersión total para el concreto de referencia y las diferentes adiciones de ARC a los 28 días de edad.

Figura 61. Absorción por inmersión total de los concretos a la edad de 28 días. **Fuente:** Propia.



Se observó una disminución de la absorción con el aumento del contenido de ARC, los valores para las mezclas con adición de 10, 20 y 40 % de ARC mostraron una caída del orden del 3%, 4% y hasta 16%, respectivamente. Dado que el resultado de este ensayo (% de vacíos) puede interpretarse como una medida de la porosidad total del concreto, se infiere que la presencia del agregado reciclado promovió el aumento de la hidratación debido a la pasta de alta resistencia adherida a la superficie de este. Lo anterior, está relacionado con el comportamiento de la resistencia a la compresión, donde el concreto RC40 obtuvo los mayores valores.

5.6 Absorción Capilar

Este ensayo se ejecutó siguiendo la metodología de la Norma Brasileira descrita en el capítulo 3, en 3 muestras cilíndricas a los 28 días de edad. En la Tabla 44 se presentan los resultados promedio de las pruebas de absorción de agua por capilaridad para cada uno de los concretos estudiados expresado en unidades de g/cm^2 .

Tabla 44. Resultados promedio de la prueba de absorción de agua por capilaridad en los cilindros de ensayo para las mezclas a 28 días de edad del concreto (g/cm^2). **Fuente:** Propia.

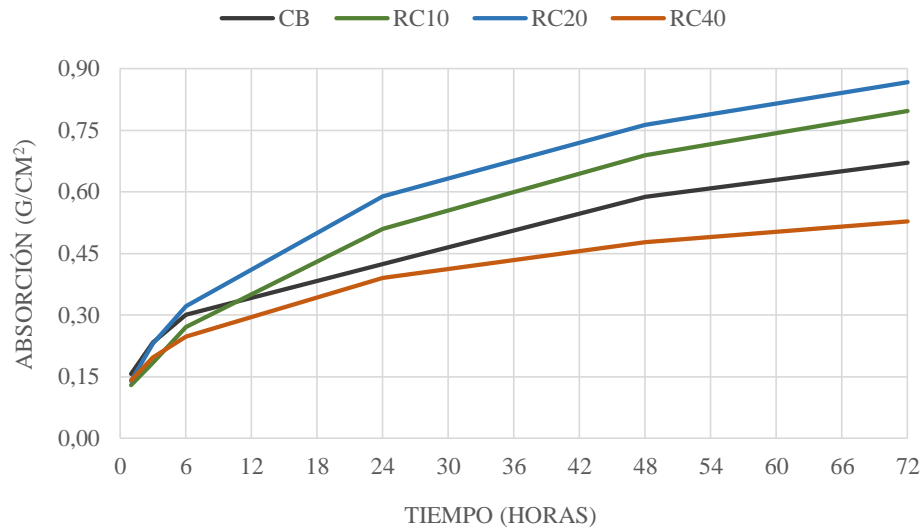
ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD (g/cm^2) 28 DÍAS						
MEZCLA	1hr	3hr	6hr	24hr	48hr	72hr
CB	0,16	0,23	0,30	0,42	0,59	0,67
RC10	0,13	0,18	0,27	0,51	0,69	0,80
RC20	0,14	0,23	0,32	0,59	0,76	0,87
RC40	0,14	0,20	0,25	0,39	0,48	0,53

El fenómeno de la penetración de líquidos por capilaridad se presenta debido a la tensión superficial del agua que actúa en los poros del concreto. Esta propiedad, asociada a la durabilidad, depende principalmente de las características del líquido y del sólido, especialmente de su estructura porosa (radio, tortuosidad y conectividad de los poros).

Al comparar los resultados se observa que la mezcla de referencia mostró una absorción capilar igual a $0,67 \text{ g}/\text{cm}^2$, a los 28 días de edad y con 72 horas de contacto con la lámina de agua de la superficie inferior del cilindro de prueba. Este valor fue aumentando a medida que se adicionó ARC, hasta un porcentaje del 20%. La mezcla con el 40% de ARC tuvo un mejor comportamiento, incluso por debajo del concreto base. Lo cual explica y ratifica sus cualidades impermeables en la clasificación de CAD según la NBR 9778 (1987), con relación a los datos obtenidos en el ensayo de absorción por inmersión total.

En la Figura 62 se muestra la evolución de la prueba de absorción de agua por capilaridad para el concreto de referencia y las diferentes adiciones de ARC a los 28 días de edad y en un tiempo de contacto de la cara inferior del cilindro con la lámina de agua de 0 a 72 horas.

Figura 62. Evolución de la absorción promedio de agua por capilaridad en los concretos. **Fuente:** Propia.



Como era de esperarse el tiempo es una variable influyente en esta propiedad. Si se analizan los valores iniciales (hasta 6 horas), se observa que los concretos CB y RC20 tuvieron una velocidad de ascensión capilar mayor que los concretos RC10 y RC40. Sin embargo, a las 72 h este panorama cambia, y el concreto base termina teniendo una absorción menor que RC10 y RC20. Esto demuestra que este fenómeno no solo depende de la porosidad total del concreto, pues según lo encontrado en el ítem 5.5 el concreto de referencia tuvo la absorción total mayor.

En la Tabla 45 se presentan los resultados promedio de la penetración de agua por absorción capilar para cada una de los concretos estudiados a 28 días de edad y 72 horas de contacto con el agua.

Tabla 45. Resultados promedio de la penetración de agua por absorción de los concretos. **Fuente:** Propia.

MEZCLA	ALTURA (cm)
CB	5,38
RC10	7,05
RC20	7,49
RC40	3,88

Se concluye que la absorción por capilaridad está ligada también al diámetro y conectividad de los poros, pues aunque la muestra CB presentó mayor absorción total, también tuvo una menor altura de penetración que los concretos RC10 y RC20, dado que a menor diámetro de poros puede ocurrir una mayor ascensión capilar del líquido. Estudios más detallados sobre la porosidad de los concretos serán necesarios para explicar completamente este comportamiento.

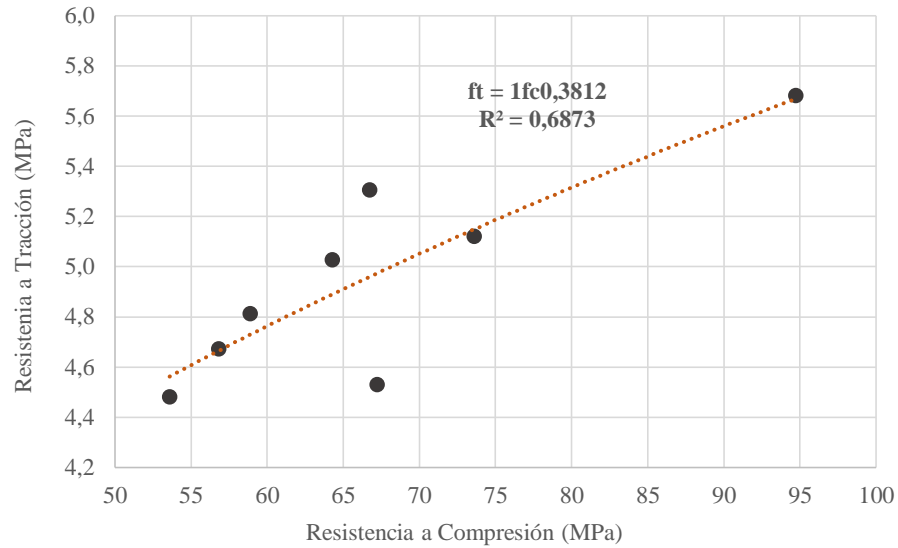
5.7 Análisis de Relación entre Parámetros

Aunque no es el objetivo de este trabajo, la correlación entre variables toma importancia desde el punto de vista práctico porque muchas veces no es posible la realización de ensayos para determinar todas las propiedades del concreto. A continuación, se presentan las correlaciones encontradas de los resultados de las propiedades estudiadas, con el fin de analizar la posible dependencia de una variable con respecto a otra dependiente. Este análisis se realizó mediante diagramas de dispersión, que indican la dirección de una relación proporcional entre dos variables estadísticas.

5.7.1 Resistencia a la Compresión vs Resistencia a la Tracción Indirecta

A partir de los resultados promedio obtenidos experimentalmente para todas las condiciones de estudiadas de los concretos, se estableció una correlación general entre la resistencia a compresión (f_c) y la resistencia a la tracción (f_t), que se presenta en la Figura 63 y que incluye la ecuación generada por la regresión calculada por el método de los mínimos cuadrados.

Figura 63. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y a tracción indirecta (f_t). **Fuente:** Propia.

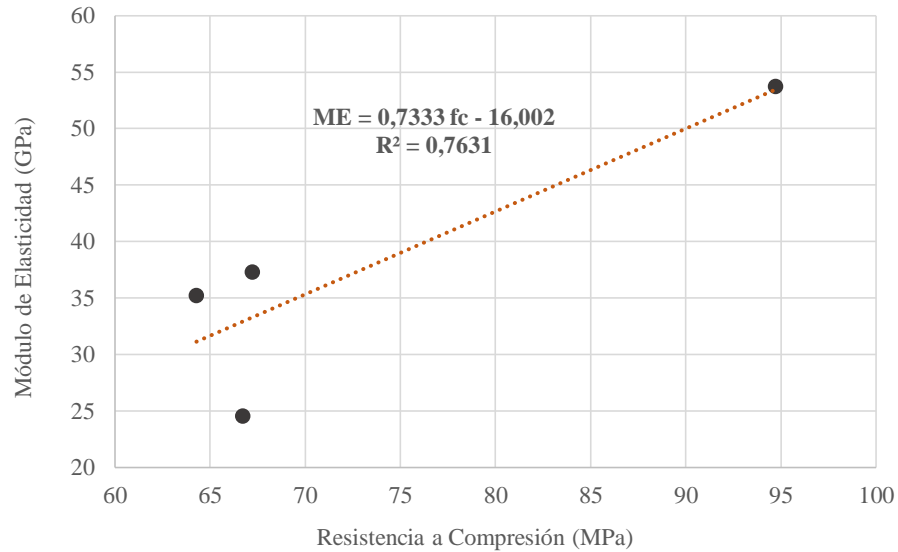


La ecuación presentada en la figura expresa la consistencia de la relación entre las dos propiedades y refleja un coeficiente de determinación ($R^2=0,6873$) aceptable. Sin embargo, el análisis se ve afectado, especialmente, por el valor atípico de la resistencia a tracción indirecta a 7 días del concreto RC20. Adicionalmente, se observa que a medida que se incrementa la resistencia a compresión, no necesariamente, la resistencia a tracción indirecta crece en la misma proporción. De esta manera, toma importancia tener mayor un volumen de datos de esta dependencia para concretos de alta resistencia.

5.7.2 Resistencia a la Compresión vs Módulo de Elasticidad

Para analizar la correlación entre la resistencia a compresión (f_c) y el módulo de elasticidad (ME), se tomaron en cuenta los resultados promedio de todos los concretos estudiados a la edad de 28 días. En la Figura 64 se observa el diagrama de dispersión y la relación lineal entre los valores obtenidos experimentalmente para cada una de las mezclas.

Figura 64. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y el módulo de elasticidad (ME). **Fuente:** Propia.

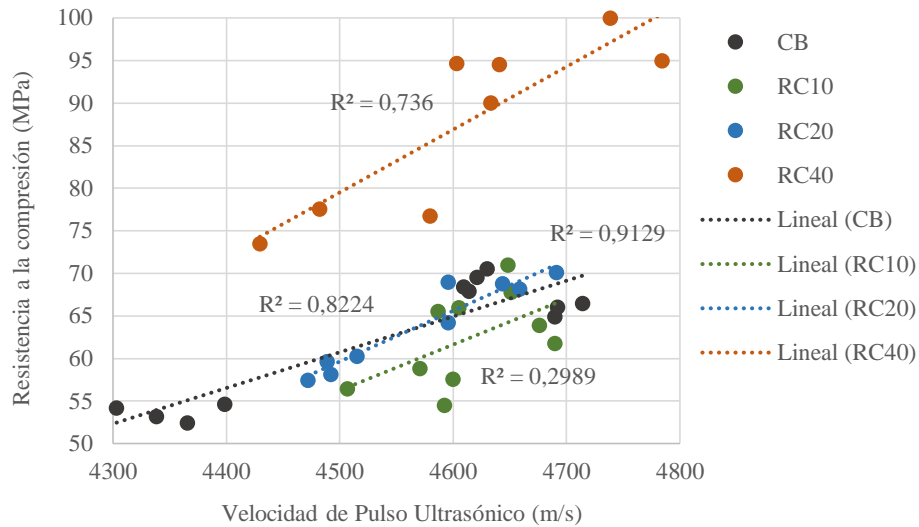


Como era esperado, se presenta una relación directamente proporcional entre las propiedades, lo cual explica el valor aceptable del coeficiente de correlación ($R^2=0,7631$). Sin embargo, cabe aclarar que el número de resultados hacen que el análisis sea incipiente y que, por tanto, más investigaciones sobre esta dependencia deberán realizarse para CAR.

5.7.3 Resistencia a la Compresión vs Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para analizar la correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, se evaluaron los resultados de los especímenes ensayados, en las edades de 7, 28 y 56 días, de cada variable independiente. En la Figura 65 se observa el diagrama de dispersión y la relación lineal entre los valores obtenidos experimentalmente entre las variables respectivas.

Figura 65. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. **Fuente:** Propia.

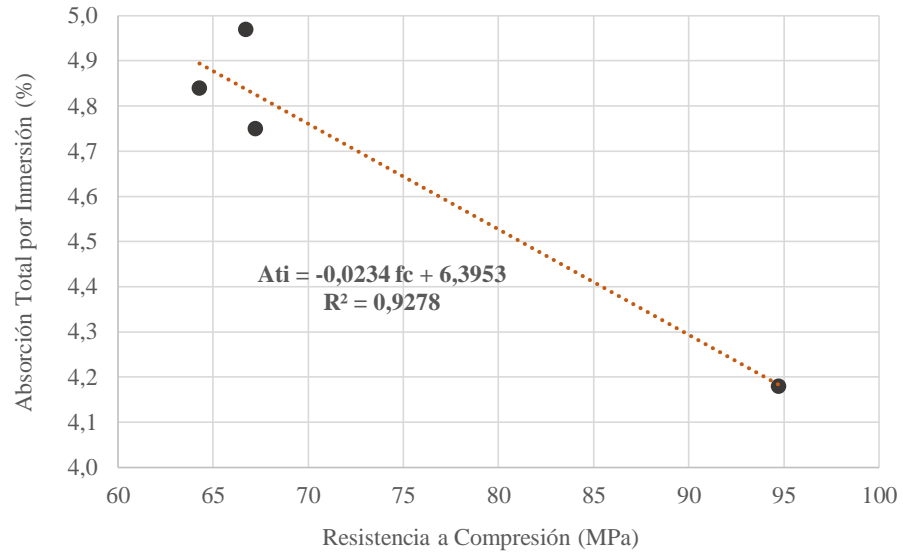


En la gráfica anterior se pudo observar que en las mezclas CB, RC20 y RC40 hubo una fuerte correlación directamente proporcional entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, lo que explica el elevado valor del coeficiente de determinación (R^2). Los resultados de la mezcla RC10 muestran una relación débil en función de R^2 encontrado, esto se observa debido a que sus valores no presentan un comportamiento lineal definido.

5.7.4 Resistencia a la Compresión vs Absorción Total

Para el análisis de la correlación entre la resistencia a compresión y la absorción total por inmersión de los concretos, se evaluaron los resultados promedio a la edad de 28 días. En la Figura 66 se observa el diagrama de dispersión y la relación lineal entre los valores obtenidos experimentalmente para cada una de las mezclas.

Figura 66. Correlación entre los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a compresión (f_c) y la absorción total por inmersión (A_{ti}). **Fuente:** Propia.



Como se esperaba, se observó una fuerte correlación entre las propiedades, fundamentada en el elevado valor del coeficiente de determinación ($R^2=0,9278$). Según lo explicado en el ítem 4.5, la absorción por inmersión está íntimamente relacionada con la porosidad del concreto y por tanto con la resistencia mecánica del mismo. Por lo tanto, el ensayo de absorción total se torna como una alternativa viable para el estudio indirecto de la microestructura de los concretos de alta resistencia.

6 CONCLUSIONES

Después de cumplir con el programa experimental planeado para alcanzar los objetivos propuestos, se destacan las siguientes conclusiones:

Se evidencia que es posible la producción de agregados reciclados, fabricados con residuos de concreto de alta resistencia provenientes de especímenes de ensayo en laboratorio, que cumplan con las especificaciones técnicas estipuladas por la Normativa Colombiana para la producción de concretos.

La incorporación del ARC puede afectar negativamente las propiedades en estado fresco del CAR, esto puede ser causado por la elevada absorción del agregado reciclado, así como la forma y textura de las partículas. Se recomienda el uso de aditivos superplastificantes y la saturación del agregado antes del procedimiento de mezclado.

En los concretos de alta resistencia la escogencia del agregado toma una elevada relevancia, debido a la mejora en las demás fases constitutivas del material (pasta de cemento hidratada y zona de transición). Por lo tanto, se concluye que es posible la fabricación de CAR con la sustitución parcial de agregado natural por agregado reciclado de concreto. Al evaluarse la resistencia a la compresión, se determinó que la incorporación del ARC no afectó negativamente esta propiedad y que, para el reemplazo del 40% del agregado grueso, se incrementaron los valores de la resistencia. Lo anterior, puede explicarse debido a la hidratación del cemento anhidro presente en la pasta de cemento de alta resistencia del ARC, así como a la mejora de la adherencia entre el agregado reciclado y la pasta de cemento causada por la textura superficial.

La incorporación de ARC al concreto no tuvo un efecto positivo en la resistencia a la tracción indirecta en el tiempo. Sin embargo, debido a la calidad del agregado reciclado, hubo una

influencia positiva en el módulo de elasticidad del concreto con el aumento de las cantidades de reemplazo.

Con respecto a las propiedades físicas asociadas a durabilidad, se concluye que la incorporación de agregado reciclado produjo una disminución en los vacíos y, por lo tanto, en la porosidad del concreto, lo que puede impactar positivamente la durabilidad y vida útil de las estructuras. De igual forma, al analizar los resultados de la absorción por capilaridad, se determinó que hubo una mayor penetración de agua en las mezclas con 10 y 20% de ARC, lo que parece indicar un cambio en la estructura de poros del concreto (radio, conectividad y tortuosidad), causada por el agregado reciclado.

Finalmente, con el desarrollo del presente trabajo se espera promover el uso del ARC para la fabricación de diferentes clases de concretos. Esto toma importancia, en el contexto de la economía circular, para la producción de materiales sostenibles con excelente desempeño mecánico, que disminuyan de manera significativa el impacto al medio ambiente del sector de la construcción, que contribuyan en la conservación del planeta y aporten al cumplimiento de las metas de aprovechamiento de RCD propuestas en la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia.

6.1 Recomendaciones para trabajos futuros

De acuerdo con los resultados positivos alcanzados y las limitaciones del presente estudio, se recomiendan las siguientes temáticas para el desarrollo de trabajos futuros:

Investigar el uso de agregados finos reciclados provenientes de concretos de alta resistencia en la producción de diferentes clases de concreto.

Evaluar el efecto de la incorporación de agregados reciclados, en las propiedades en estado fresco y en la microestructura de los CAR.

Estudiar el impacto derivado de la utilización de ARC en la durabilidad de los CAR.

Analizar y cuantificar el impacto económico de la producción y el uso del ARC frente agregados de origen natural en la elaboración de concreto para la construcción de edificaciones.

Evaluar el impacto ambiental de la incorporación del ARC en la fabricación de concretos, por medio de diferentes metodologías como el análisis de ciclo de vida, la energía incorporada o el cálculo de la huella de carbono.

Analizar la viabilidad de la fabricación de CAR con agregados producidos de residuos de construcción y demolición (RCD) captados directamente de obra.

7 GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES

Agregados Reciclados del Concreto (ARC): Transformación de los residuos de concreto en materia prima o insumos para los materiales de construcción, con el fin de reincorporarlos al ciclo económico de producción de concreto (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Residuos de Concreto (RC): Residuos sólidos provenientes de la trituración de los especímenes de prueba, fabricados en los laboratorios para la producción de calidad del concreto.

Concreto de Alta Resistencia (CAR): Es un concreto que se enfoca principalmente en la resistencia mecánica, según la ACI 363.2R lo define como mayor o igual de la resistencia a compresión de $f'c = 56$ MPa (8000 psi) (American Concrete Institute, 2018).

Residuos de Construcción y Demolición (RCD): Son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

American Concrete Institute (ACI): Organización de los Estados Unidos de América que desarrolla estándares, normas y recomendaciones técnicas para la producción del concreto reforzado (American Concrete Institute, 2018).

8 BIBLIOGRAFÍA

- ACI 211.4R-08. Guide for selecting proportions for high-strength concrete using portland cement and other cementitious materials, 93 § (2008).
- Aïtcin, P. C. (2011). *High Performance Concrete*. (CRC Press, Ed.).
- Alcalde, L., & López, D. (2015). Uso de residuos de construcción y de demolición reciclados (RCD-R-R) con adición de suelo natural como material de pavimentos.
- Alcaldía de Santiago de Cali. Decreto 0771 (2018).
- Amario, M., Rangel, C. S., Pepe, M., & Toledo Filho, R. D. (2017). Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. *Cement and Concrete Composites*, 84, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.016>
- American Concrete Institute. (2018). About ACI. Retrieved from <https://www.concrete.org/aboutaci.aspx>
- Arenas, F. (2007). *El impacto ambiental en la construcción industrial. Criterios para una construcción sostenible*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- Armijos, J. (2019). *Caracterización de la generación de residuos de construcción en sistemas industrializados para viviendas de interés social, en la ciudad de Santiago de Cali*.
- Asamblea General Naciones Unidas. Agenda 2030 resolución 70/1, 16301 § (2015).
- ASTM International E178 - 08. Standard Practice for Dealing With Outlying Observations (2015). <https://doi.org/10.1520/E0178-08.Copyright>
- Bravo German, A. M., & Bravo Gómez, I. D. (2018). Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto fabricado con agregados reciclados provenientes de adoquines, 188.

- Buss, A., Saccol, J., & Bastianello, L. (2012). Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS, 121–130.
- Caicedo Campo, S. L., & Perez Henao, J. M. (2014). Estudio del uso de agregados reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines, 94.
- Caicedo Quinayás, C. S. (2016). Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento portland, 143.
- CAMACOL. (2016). Tendencias de la construcción - Economía y coyuntura sectorial, 64.
- CMIC. (2014). Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición. Retrieved from <http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PMRCDCompleto.pdf>
- Comisión Europea. (2014). Decisión de la comisión de 18 de diciembre de 2014 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Consejo Nacional del Medio Ambiente. Resolución CONAMA 307 (2002).
- DANE. (2019). Estadísticas de concreto premezclado (EC). Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado>
- DANE. (2020). *Estadísticas de Concreto Premezclado (EC)*.
- Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3874 (2016).

- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- Eurostat. (2016). Estadísticas sobre residuos. Retrieved from http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/es
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Avramikos, E., Sgourou, E., Moustakas, K., Kourmoussis, F., ... Loizidou, M. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece-an existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling. Sciencedirect*, 40(1), 81–91. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00035-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00035-1)
- GEAR. (2011). *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construccion y demolicion (RCD)*.
- González, A., & Etxeberria, M. (2013). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>
- Hamad, B. S., & Dawi, A. H. (2017). Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 7(August), 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.006>
- Instituto de estudios ambientales, & Universidad Nacional de Colombia. (2017). Análisis y evaluación de la situacion actual de la internalización de costos ambientales y en salud por la gestion de residuos en Colombia.
- Laneyrie, C., Beaucour, A.-L., Green, M. F., Hebert, R. L., Ledesert, B., & Noumowe, A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected

to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368–378.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.056>

Lopes, A. N. de M. (2011). *Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.*

Maat Soluciones Ambientales. (2019). WEBINAR – Normatividad para la gestión de RCD'S distrital y nacional. Retrieved from <https://www.maat.com.co/eventos/webinar-normatividad-para-la-gestion-de-rcds-distrital-y-nacional/>

MAPEI. (2014). Dynamon SR100. Retrieved from www.mapei.com

Mena Sanclemente, C., & Valdés Castro, Y. (2014). Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de Cali para uso en obras viales de bajo tránsito., 109.

Metha, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concreto, estrutura, propriedades e materiais*. (Pini, Ed.) (3 ed.). São Paulo.

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. Decreto 4741, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, § (2005). <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.09.001>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1713 (2002). Retrieved from <http://doi.org/Diario Oficial 45210 de junio 6 de 2003>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0472 (2017).

Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 541 (1994).

Municipio de Medellin. (2013). Decreto 1609.

Municipio de Santiago de Cali. Decreto 0291 (2005).

Nagataki, S., Gokce, A., & Saeki, T. (2000). Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance Parameters of Recycled Aggregate Concrete.

NBR 10908. Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização (2008).

NBR 15116. Agregados reciclados sólidos para la construcción civil- Utilización en pavimentos o preparación de concretos sin función estructural- Requisitos (2004).

NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos -Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica (1987). Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/97110468/Nbr-9778-Argamassa-e-Concreto-Endurecidos-Determinacao-Da-Absorcao-de-Agua-Por-Imersao-Indice-de-Vazios-e-Massa-Especific>

NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. (1995).

Neville, A. (1997). *Propriedades do concreto*. (Pini, Ed.) (2^a ed.). São Paulo.

NTC 110. Cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico (2019).

NTC 118. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat (2017).

NTC 126. Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. (2016).

NTC 127. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. (2000).

NTC 1377. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio (2010).

NTC 174. Especificaciones de los agregados para concreto, Ntc 174 § (2000).

NTC 176. Metodo de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso (1995).

NTC 220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado (2017).

NTC 221. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico (2017).

NTC 237. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino (1995).

NTC 33. Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire (1997).

NTC 396. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. (1992).

NTC 4025. Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión (2006).

NTC 4325. Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto (1997).

NTC 5653. Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido. (2008).

NTC 673. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (2010).

NTC 722. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto (2000).

- NTC 77. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (2007).
- NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (1995).
- NTC 98. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles (2012).
- Pacheco Bustos, C., Fuentes Pumarejo, L., Sánchez Cotte, É., & Rondón Quintana, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión, (57). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.2.10174>
- Pepe, M. (2015). A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications, 7–17. <https://doi.org/http://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8>
- Rao, A., Jha, K., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- Republica de Colombia. Decreto 2811 (1974).
- Robayo, R., Matthey, P., Silva, Y., Burgos, D., & Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento, 19(44), 157–170. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>
- Secretaria Distrital de Ambiente. Resolución 1115, 2012 § (2012).
- Secretaria Distrital de Ambiente. Resolución 1138 (2013).
- Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra. (2014).

Secretaria Distrital de Ambiente. Resolución 0932 (2015).

Suárez-Silgado, S., Molina, J., Mahecha, L., & Calderón, L. (2018). Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 21(1), 9–21. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2>


UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. (2010).

Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30–49. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.02.005>


Vinay Kumar, B. M., Ananthan, H., & Balaji, K. V. A. (2017). Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.003>

9 ANEXOS


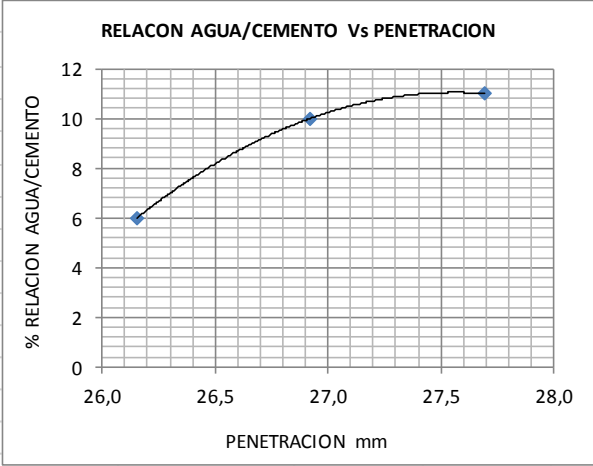
Anexo 1. Finura del cemento (NTC 33 - 1997). **Fuente:** Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES FINURA DEL CEMENTO, NTC 33 - 1997 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado Maestria			LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART			MUESTRA	1	
CLASIFICACION		FECHA	05/04/2019	HOJA No.	1	DE 1
ENSAYO				1		
Ss SUPERFICIE ESPECIFICADE LA MUESTRA PATRON.	cm ² /g	3818,00				
Ts TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON	Seg	82,52				
T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA	Seg	134,54				
S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA	cm ² /g	4875,08				
SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO				4875,08 cm²/g		


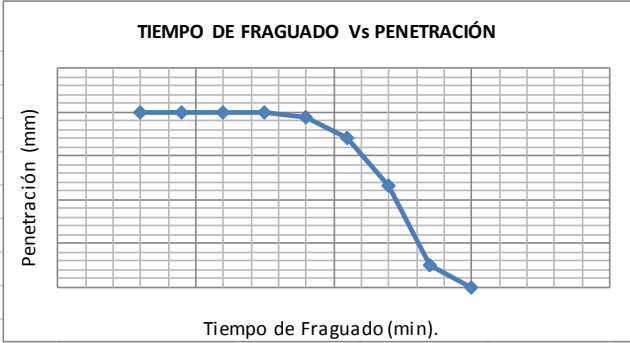
Anexo 2. Peso específico del cemento (NTC 221 - 2017). **Fuente:** Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO, NTC 221 - 2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria			LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART			MUESTRA	1	
CLASIFICACION		FECHA	05/04/2019	HOJA No.	1	DE 1
ENSAYO				1	2	3
PESO DE CEMENTO	g	64	64	64		
LECTURA INICIAL ml	cm ³	0,8	0,9	0,8		
LECTURA FINAL ml	cm ³	21	22	20,80		
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO	g/cm³	3,11	3,11	3,20		
PESO ESPECIFICO PROMEDIO		g/cm³	3,14			

Anexo 3. Consistencia normal del cemento (NTC 110 - 2019). Fuente: Propia.


		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO, NTC 110 - 2019 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
		PROYECTO	Proyecto de grado Maestria	LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART	MUESTRA	1			
CLASIFICACION		FECHA	05/04/2019	HOJA No. 1 DE 1		
ENSAYO		1	2	3		
PESO DE CEMENTO	g	650	650	650		
VOLUMEN DE AGUA	cm ³	170	175	180		
RELACION AGUA / CEMENTO	%	26,2	26,9	27,7		
PENETRACION CON SONDA DE VICAT 10 mm		6	10	11		
		<table border="1"> <tr> <td> RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%) </td> <td>26,92</td> </tr> </table>			RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)	26,92
RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)	26,92					

Anexo 4. Tiempo de fraguado del cemento (NTC 118 - 2017). Fuente: Propia.

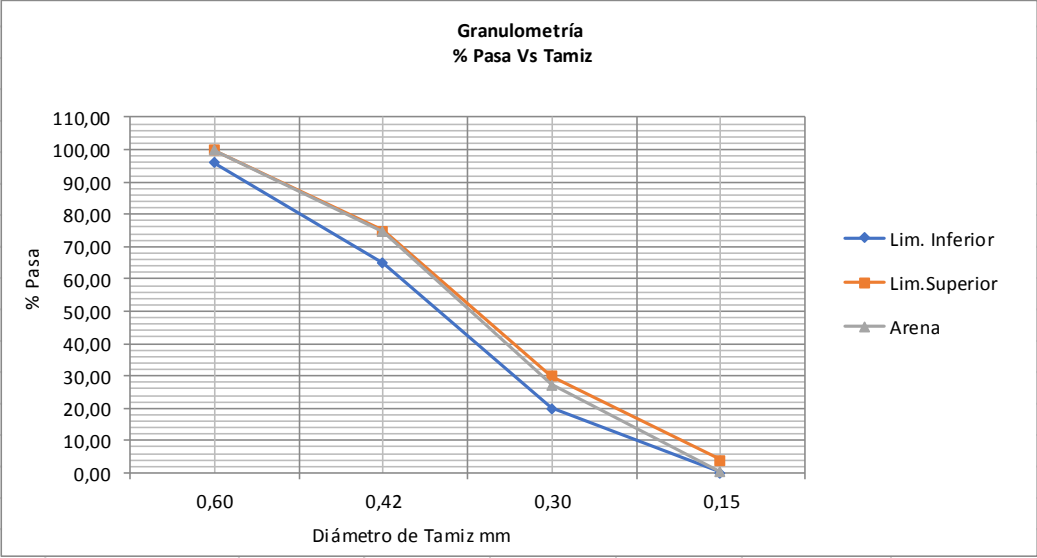
	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAULICO METODO APARATO DE VICAT, NTC 118 - 2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL																												
	PROYECTO		Proyecto de grado Maestria		LOTE	1																							
	DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cemento ART		MUESTRA	1																							
	CLASIFICACION		FECHA	05/04/2019	HOJA No.	1	DE 1																						
RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL					26,92																								
					<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ENSAYO 1</th> </tr> <tr> <th>TIEMPO DE FRAGUADO</th> <th>PENETRACION</th> </tr> <tr> <th>min</th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>30</td><td>40</td></tr> <tr><td>45</td><td>40</td></tr> <tr><td>60</td><td>40</td></tr> <tr><td>75</td><td>40</td></tr> <tr><td>90</td><td>39</td></tr> <tr><td>105</td><td>34</td></tr> <tr><td>120</td><td>23</td></tr> <tr><td>135</td><td>5</td></tr> <tr><td>150</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	ENSAYO 1		TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION	min	mm	30	40	45	40	60	40	75	40	90	39	105	34	120	23	135	5	150	0
ENSAYO 1																													
TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION																												
min	mm																												
30	40																												
45	40																												
60	40																												
75	40																												
90	39																												
105	34																												
120	23																												
135	5																												
150	0																												
TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25 mm					90,0																								
TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0 mm					150,0																								

Anexo 5. Granulometría arena gradada para ensayo de resistencia del cemento (NTC 77 - 2007).


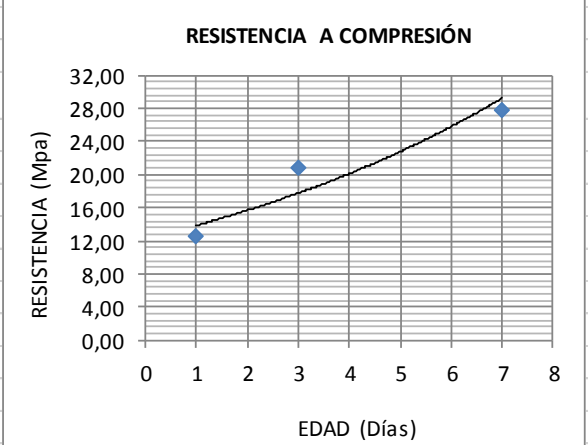
Fuente: Propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS, NTC 77 - 2007 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria	LOTE	1				
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena gradada normalizada	MUESTRA	1				
CLASIFICACION	Arena fina	FECHA	05/04/2019	HOJA No.	1 DE 1		
Peso Inicial seco antes de lavado (g)		100					
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)		100					
Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	(ASTM C 109)	
						Limite inferior	Limite superior
No 30	0,60	0,00	0,00	0,00	100,00	96,00	100,00
No 40	0,42	25,30	25,30	25,30	74,70	65,00	75,00
No 50	0,30	47,50	47,50	72,80	27,20	20,00	30,00
No 100	0,15	27,00	27,00	99,80	0,20	0,00	4,00
Fondo		0,20	0,20	100,00	0,00	0,00	0,00
Sumatoria		100,00					
		MF		2,0			
		TMN		0,30 mm			
		TM		0,42 mm			


Granulometría
% Pasa Vs Tamiz



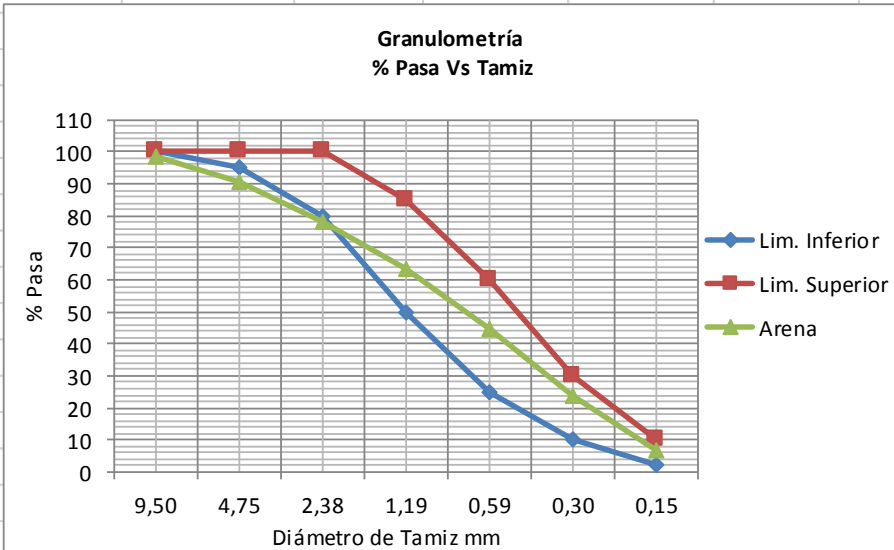
Anexo 6. Resistencia a compresión Cemento (NTC 220 - 2017). **Fuente:** Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA																																		
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL																																		
	LABORATORIO DE MATERIALES																																		
	RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CUBOS DE MORTERO, NTC 220 - 2017																																		
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL																																		
PROYECTO	Proyecto de grado Maestría				LOTE	1																													
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cubos de mortero				MUESTRA	1																													
CLASIFICACION	Cemento ART	FECHA	05/08/2019	HOJA No.	1	DE 1																													
Según la norma (ASTM C109) se realiza la mezcla de mortero con la siguiente dosificación para realizar 9 cubos:																																			
Cemento (g)	740																																		
Arena (g)	2035	Relación a/c	0,485																																
Agua (g)	359																																		
Ajuste de fluencia:		ASTM C 230 Fluidez de morteros																																	
Lec	27,25	----->	Diámetro promedio en ensayo de fluencia																																
Fluencia	109	----->	Debe estar en 110 ± 5																																
Se encontró la fluencia corregida con una relación agua cemento diferente a la de la norma por tanto hay que hacer un ajuste:																																			
Relación a/c	0,583																																		
Luego de hacer el ajuste se deben preparar los 9 cubos con la siguiente dosificación:																																			
Cemento (g)	740																																		
Arena (g)	2035																																		
Agua (g)	431,42																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Resistencia a compresión (Mpa)</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">N°</th> <th style="text-align: center;">EDAD</th> <th style="text-align: center;">1</th> <th style="text-align: center;">3</th> <th style="text-align: center;">7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td></td> <td style="text-align: center;">12,92</td> <td style="text-align: center;">20,32</td> <td style="text-align: center;">27,19</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td style="text-align: center;">11,53</td> <td style="text-align: center;">20,32</td> <td style="text-align: center;">28,79</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td></td> <td style="text-align: center;">13,09</td> <td style="text-align: center;">21,61</td> <td style="text-align: center;">27,25</td> </tr> <tr style="background-color: yellow;"> <td colspan="2" style="text-align: center;">Promedio</td> <td style="text-align: center;">12,51</td> <td style="text-align: center;">20,75</td> <td style="text-align: center;">27,74</td> </tr> </tbody> </table>							Resistencia a compresión (Mpa)				N°	EDAD	1	3	7	1		12,92	20,32	27,19	2		11,53	20,32	28,79	3		13,09	21,61	27,25	Promedio		12,51	20,75	27,74
Resistencia a compresión (Mpa)																																			
N°	EDAD	1	3	7																															
1		12,92	20,32	27,19																															
2		11,53	20,32	28,79																															
3		13,09	21,61	27,25																															
Promedio		12,51	20,75	27,74																															
																																			


Anexo 7. Granulometría arena media de rio (NTC 77 - 2007). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS, NTC 77 - 2007 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
	PROYECTO		Proyecto de grado Maestria	LOTE	1		
	DESCRIPCION DEL MATERIAL		Arena Rio Cauca	MUESTRA	1		
	CLASIFICACION		Arena Media	FECHA	HOJA No.	1 DE 1	
	Peso Inicial seco antes de lavado (g)		322,8				
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)		314,4					
Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	NTC 32 (ASTME 11)	
						Limite inferior	Limite superior
3/8	9,50	4,8	1	1	99	100	100
No 4	4,75	25,6	8	9	91	95	100
No 8	2,38	39,3	12	22	78	80	100
No 16	1,19	47,6	15	36	64	50	85
No 30	0,59	59,9	19	55	45	25	60
No 50	0,30	69,2	21	77	23	10	30
No 100	0,15	53	16	93	7	2	10
No 200	0,07	14,2	4	97	3		
Fondo		8,4	3	100	0		
Sumatoria		322,0					
				MF	2,9		
				TMN	4,75 mm		
				TM	9,50 mm		




Granulometría
% Pasa Vs Tamiz




Anexo 8. Masas unitarias arena media de rio (NTC 92 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
	LABORATORIO DE MATERIALES				
	MASAS UNITARIAS AGREGADO FINO, NTC 92 - 1995				
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria		LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena Rio Cauca		MUESTRA	1	
CLASIFICACION	Arena Media	FECHA	HOJA No.	1	DE 1
AGREGADOS COMPACTADOS					
Método de compactación					
Ensayo No.			1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		(G)	5,257	5,263	5,211
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
Densidad bulk del agregado, kg/L		M	1,803	1,805	1,786
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L			1,798		
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L			1,779		
AGREGADOS SUELTOS					
Ensayo No.			1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg		(G)	4,792	4,817	4,784
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
Densidad bulk del agregado, kg/L		M	1,636	1,645	1,633
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L			1,638		
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L			1,620		
Humedad (%)					
1,1					


Anexo 9. Materia orgánica arena media de rio (NTC 127 - 2000). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
	LABORATORIO DE MATERIALES			
	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA EN EL AGREGADO FINO, NTC 127 - 2000			
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria	LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena Rio Cauca	MUESTRA	1	
CLASIFICACION	Arena Media	FECHA	HOJA No.	1 DE 1
ANALISIS COLORIMETRO CON ESCALA DE COLORES NORMALIZADA				
ANTES		DESPUES DE 24 HR		
				
OBSERVACIÓN:	Se observa que el nivel alcanzado despues de 24 horas, el color normalizado de la arena media del Rio Cauca se encuentra en el rango No 3 La cual es aceptable para usar en las mezclas de concreto.			


Anexo 10. Peso específico y absorción Arena media de río (NTC 237 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
	LABORATORIO DE MATERIALES				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS, NTC 237 - 1995				
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de grado Maestría		LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena Río Cauca		MUESTRA	1	
CLASIFICACION	Arena Media	FECHA	HOJA No.	1	DE 1
			<u>3</u>	6	4
Ensayo No.			1	2	3
Picnómetro No.			1	2	4
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g	(S)	500	500	500	
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	(C)	955,6	955,2	956,5	
Temperatura de ensayo (°C)		29,5	29	28,5	
Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	(B)	644,3	643,8	645,1	
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g	(A)	488,7	488,7	488,2	
CALCULOS					
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,590	2,591	2,589	Promedio
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,	Gsbsss	2,818	2,820	2,828	2,822
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,755	2,756	2,761	
Absorción	% Abs	2,312	2,312	2,417	2,347
Gsb =	$A/(B+S-C)$				
Gsbsss =	$S/(B+S-C)$				
Gsa =	$A/(B+A-C)$				
% Absorción =	$(S-A)/A * 100$				


Anexo 11. Ensayo de solidez arena media de rio. (NTC 126 - 2016). **Fuente:** Propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE SOLIDEZ DEL AGREGADO FINO FRENTE A LA EXPOSICION DE SULFATO, NTC 126 - 2016 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL									
		PROYECTO				Proyecto de grado Maestria		LOTE		1	
		DESCRIPCION DEL MATERIAL				Arena Rio Cauca		MUESTRA		1	
		CLASIFICACION				Arena Media		FECHA		HOJA No. 1 DE 1	
Tamiz pasa	Tamiz retenido	% Retenido granulometria	% Referido	Peso inicial	Peso final	% Perdida inicial	% Perdida ponderada				
3/8"	N°4	7,95	8,07	0,00	0,00	0,00	0,00				
	N°4	12,20	12,39	100,00	88,10	11,90	1,47				
	N°8	14,78	15,01	100,00	73,90	26,10	3,92				
	N°16	18,60	18,88	100,00	42,40	57,60	10,88				
	N°30	44,97	45,65	100,00	64,00	36,00	16,44				
	Sumatoria	98,50	100,00	% Total perdida		32,70					
SOLUCION UTILIZADA		Sulfato de Sodio									


Anexo 13. Desgaste agregado grueso (NTC 98 – 2012). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
	LABORATORIO DE MATERIALES			
	DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS, NTC 98 - 2012			
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria		LOTE	1
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Agregado Grueso		MUESTRA	1
CLASIFICACION	Agregado Grueso	FECHA	HOJA No.	1 DE 1
No. Pruebas			1	
Gradación usada			B	
No. De esferas			11	
No. De revoluciones			500	
(Pa) Peso de la muestra seca antes del ensayo (g)			5000	
(Pb) Peso muestra seca despues del ensayo y despues de lavar sobre tamiz No.12 (g)			4136	
Pa - Pb = Pérdida (g)			864	
% Desgaste = (Pa-Pb)/Pa x100 (%)			17,28	


Anexo 14. Masas unitarias agregado grueso (NTC 92 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES MASAS UNITARIAS AGREGADO GRUESO, NTC 92 - 1995 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
	PROYECTO		Proyecto de grado Maestría		LOTE	1
	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Agregado Grueso		MUESTRA	1
	CLASIFICACIÓN		Agregado Grueso	FECHA	HOJA No.	1
						DE 1
AGREGADOS COMPACTADOS						
Método de compactación						
Ensayo No.				1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		(G)		15,74	15,64	15,6
Masa del recipiente de medida, (kg)		(T)		0,38	0,38	0,38
Volumen del recipiente de medida, L		(V)		9,68	9,68	9,68
Densidad bulk del agregado, kg/L		M		1,587	1,576	1,572
Promedio densidad bulk agregado estado sss, kg/L				1,579		
Promedio densidad bulk agregado estado seco, kg/L				1,554		
AGREGADOS SUELTOS						
Ensayo No.				1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg		(G)		14,58	14,54	14,58
Masa del recipiente de medida, kg		(T)		0,38	0,38	0,38
Volumen del recipiente de medida, L		(V)		9,68	9,68	9,68
Densidad bulk del agregado, kg/L		M		1,47	1,46	1,47
Promedio densidad bulk agregado estado sss, kg/L				1,47		
Promedio densidad bulk agregado estado seco, kg/L				1,44		
Humedad (w) %						
1,563						

Anexo 15. Peso específico y absorción agregado grueso (NTC 176 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
	LABORATORIO DE MATERIALES				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO, NTC 176 - 1995				
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de grado Maestría	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Ag. Grueso	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	Ag. Grueso	FECHA			
		HOJA No.	1	DE 1	
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra en estado sss , g	(B)		1240,90	1114,10	1043,40
Masa de la muestra sumergida en agua, g	(C)		691,00	726,10	681,10
Masa al aire de la muestra seca al horno, g	(A)		1228,80	1102,70	1033,00
CALCULOS					
Desviación Estándar			100,069	23,647	99,245
Gravedad específica bulk,	Gsb		2,235	2,842	2,851
Gravedad específica bulk estado sss	Gsbsss		2,257	2,871	2,880
Gravedad específica aparente	Gsa		2,285	2,928	2,935
Absorción	% Abs		0,985	1,034	1,007
Gsb = A/(B-C)					
Gsbsss = B/(B-C)					
Gsa = A/(A-C)					
% Absorción = (B-A)/A * 100					

Anexo 16. Ensayo de solidez agregado grueso. (NTC 126 - 2016). Fuente: Propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA					
		FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL					
		LABORATORIO DE MATERIALES					
		ANALISIS DE SOLIDEZ DEL AGREGADO GRUESO FRENTE A LA EXPOSICION DE SULFATO, NTC 126 - 2016					
		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO		Proyecto de grado Maestria				LOTE	1
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Ag. Gueso				MUESTRA	1
CLASIFICACION		Ag. Gueso		FECHA		HOJA No.	1 DE 1
Tamiz pasa	Tamiz retenido	% Retenido granulometria	% Referido	Peso inicial	Peso final	% Perdida inicial	% Perdida ponderada
2.5"-2"	2"-1 1/2"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2"-1"	1"- 3/4"	0,42	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	71,31	71,31	1015,30	998,50	1,65	1,18
3/8"	N°4	28,27	28,27	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sumatoria	100,00	100,00	% Total perdida		1,18	
SOLUCION UTILIZADA		Sulfato de Sodio					

Anexo 17. Granulometría ARC (NTC 77 - 2007). Fuente: Propia.


Tamiz	Diámetro mm	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	NTC 174 (Quinta Actualización)	
						Limite inferior	Limite superior
1 1/2"	37,50		0	0	100		
1"	25,40		0	0	100	100	100
3/4"	18,75	192,0	5	5	95	90	100
1/2"	12,50	1354,0	38,1	44	56	55	78
3/8"	9,50	830,0	23,4	67	33	20	55
No 4	4,75	1176,0	33,1	100	0	0	10
No 8	2,38		0	100	0		
No 16	1,19		0	100	0		
Fondo			0,0	100	0		
Sumatoria		3552,0					

MF	6,72
TMN	19 mm
TM	25 mm


Granulometría
% Pasa Vs Tamiz

Diámetro de Tamiz mm	Lim. Inferior (%)	ARC (%)	Lim. Superior (%)
25,40	100	100	100
18,75	90	95	100
12,50	55	56	78
9,50	20	33	55
4,75	0	0	10


Anexo 18. Desgaste ARC (NTC 98 – 2012). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA						
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL						
	LABORATORIO DE MATERIALES						
	DESGASTE DE ARC, NTC 98 - 2012						
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria			LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARC			MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARC	FECHA		HOJA No.	1	DE 1	
No. Pruebas				1			
Gradación usada				B			
No. De esferas				11			
No. De revoluciones				500			
(Pa) Peso de la muestra seca antes del ensayo g				5000			
(Pb) Peso muestra seca despues del ensayo y despues de lavar sobre tamiz No.12 (g)				3475			
Pa - Pb = Pérdida (g)				1525			
% Desgaste = (Pa-Pb)/Pa x100 (%)				30,5			


Anexo 19. Masas unitarias ARC (NTC 92 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA					
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL					
	LABORATORIO DE MATERIALES					
	MASAS UNITARIAS ARC, NTC 92 - 1995					
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de grado Maestria			LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARC			MUESTRA	1	
CLASIFICACION	ARC	FECHA	08/02/2019	HOJA No.	1	DE 1
AGREGADOS COMPACTADOS						
Método de compactación						
Ensayo No.				1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		(G)		4,207	4,222	4,198
Masa del recipiente de medida, (kg)		(T)		0,374	0,374	0,374
Volumen del recipiente de medida, L		(V)		2,78	2,78	2,78
Densidad bulk del agregado, kg/L		M		1,379	1,384	1,376
Promedio densidad bulk agregado estado sss, kg/L				1,379		
Promedio densidad bulk agregado estado seco, kg/L				1,335		
AGREGADOS SUELTOS						
Ensayo No.				1	2	3
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		(G)		3,969	4,018	3,941
Masa del recipiente de medida, kg		(T)		0,374	0,374	0,374
Volumen del recipiente de medida, L		(V)		2,78	2,78	2,78
Densidad bulk del agregado, kg/L		(M)		1,293	1,311	1,283
Promedio densidad bulk agregado estado sss, kg/L				1,296		
Promedio densidad bulk agregado estado seco, kg/L				1,254		
Humedad (w) %						
3,3						

Anexo 20. Peso específico y absorción ARC (NTC 176 - 1995). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE ARC, NTC 176 - 1995 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL					
	PROYECTO	Proyecto de grado Maestría	LOTE	1		
	DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARC	MUESTRA	1		
	CLASIFICACION	ARC	FECHA	HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3	
Masa de la muestra en estado sss , g	(B)		341	452,8	455,2	
Masa de la muestra sumergida en agua, g	(C)		205,6	275,1	276,2	
Masa al aire de la muestra seca al horno, g	(A)		322,4	429,6	433,2	
CALCULOS						
Desviación Estándar			65,25	40,4	62,96	
Gravedad específica bulk,	Gsb		2,38	2,42	2,42	Promedio
Gravedad específica bulk estado sss	Gsb sss		2,52	2,55	2,54	2,54
Gravedad específica aparente	Gsa		2,76	2,78	2,76	
Absorción	% Abs		5,77	5,40	5,08	5,416
Gsb = A/(B-C)						
Gsb sss = B/(B-C)						
Gsa = A/(A-C)						
% Absorción = (B-A)/A * 100						

Anexo 21. Ensayo de solidez ARC. (NTC 126 - 2016). Fuente: Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA						
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL						
	LABORATORIO DE MATERIALES						
	ANALISIS DE SOLIDEZ DEL ARC FRENTE A LA EXPOSICION DE SULFATO, NTC 126 - 2016						
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL							
PROYECTO		Proyecto de grado Maestria			LOTE		1
DESCRIPCION DEL MATERIAL		ARC			MUESTRA		1
CLASIFICACION		ARC		FECHA		HOJA No.	
						1	
						DE 1	
Tamiz pasa	Tamiz retenido	% Retenido granulometria	% Referido	Peso inicial	Peso final	% Perdida inicial	% Perdida ponderada
2.5"-2"	2"-1 1/2"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2"-1"	1"- 3/4"	5,77	5,77	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"-1/2"	1/2"-3/8"	61,58	61,58	1015,80	980,00	3,52	2,17
3/8"	N°4	32,65	32,65	303,00	253,00	16,50	5,39
	Sumatoria	100,00	100,00	% Total perdida		7,56	
SOLUCION UTILIZADA		Sulfato de Sodio					



Dynamon SR100

Superfluidificante de base acrílica modificada para hormigones preparados, caracterizados por una baja relación agua/cemento y largo mantenimiento de la trabajabilidad incluso en climas calurosos

DESCRIPCIÓN DE PRODUCTO

Dynamon SR100 es un aditivo de base acrílica modificada, específico para el hormigón preparado, perteneciente al sistema MAPEI **Dynamon SR**.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Gracias a su elevada trabajabilidad, los hormigones confeccionados con **Dynamon SR100** resultan de fácil colocación en obra en su estado fresco y de elevadas prestaciones mecánicas en estado endurecido.

Dynamon SR100 está indicado particularmente en los sectores del hormigón preparado y donde sea necesaria una fuerte reducción de agua acompañada por una buena aceleración de las resistencias mecánicas a edades corta combinadas con largo mantenimiento de la trabajabilidad en las diferentes clases de consistencia.

La utilización de **Dynamon SR100** resulta ventajosa cuando se deban realizar amasadas en climas muy calurosos o cuando se tenga que transportar el hormigón a larga distancia.

Sus prestaciones lo hacen particularmente idóneo también para la realización de hormigones autocompactantes, ya que **Dynamon SR100** tiene la capacidad de garantizar una elevada fluidez.

Para la producción de hormigones autocompactantes es necesario de complementar el uso de **Dynamon SR100** con **Viscofluid SCC/10** o **Viscostar 3K**, aditivos modificadores de la viscosidad, para evitar los riesgos de segregación y garantizar la homogeneidad de las mezclas con consistencias (escurrimientos/slump-flow) muy elevadas.

Los mayores campos de aplicación de **Dynamon SR100** son la producción de hormigón preparado:

- caracterizado por una larga conservación de las clase de consistencia, en el clima caluroso;

- destinado a obras impermeables y duraderas en las clases de exposición previstas;
- hormigón autocompactantes con largo mantenimiento del flow.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Dynamon SR100 es una solución acuosa de polímeros acrílicos (sin formaldehídos) capaces de dispersar eficazmente los granulos de cemento y de favorecer un desarrollo lento de los productos de hidratación del cemento.

MÉTODO DE UTILIZACIÓN

Dynamon SR100 desarrolla la máxima acción dispersante cuando es añadido después de los otros componente de la mezcla (cemento, áridos, minerales o filler y al menos un 80% del agua de la mezcla) y antes de **Viscofluid SCC/10** o **Viscostar 3K**.

COMPATIBILIDAD CON OTROS PRODUCTOS MAPEI

Dynamon SR100 es compatible con otros productos para la producción de hormigones especiales y en particular con:

- los aditivos aceleradores de endurecimiento sin cloruros de la gama **Mapefast** para la consecución de altas resistencias mecánicas a las edades tempranas y con climas fríos;
- los aditivos retardadores de fraguado de la gama **Mapetard** para la producción de hormigones con un mantenimiento de la trabajabilidad muy largo y para el control de los tiempos de fraguado;
- el aditivo en polvo **Mapeplast SF** con base microsílíce para la producción de hormigón "top-quality" para resistencia mecánica, impermeabilidad y durabilidad;
- el agente expansivo **Expancrete** para la producción de hormigones autoncompactantes y cualquier tipo que necesiten tal aditivación;

Dynamon SR100

DATOS TÉCNICOS (valores característicos)

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO

Aspecto:	liquido
Color:	marrón
Densidad según ISO 758 (g/cm ³):	1,15 ± 0,03 a +20°C
pH:	7,0 ± 1,0
Acción principal:	reducción del agua de amasado, mantenimiento de la trabajabilidad para largos periodos en climas particularmente calurosos
Acción colateral:	retardación de la hidratación inicial y mantenimiento de la trabajabilidad
Clasificación según EN 934-2:	retardador de fraguado, superfluidificante reductor de agua de alta eficacia 11.1 and 11.2
Clasificación según ASTM C494:	tipo G
Clasificación según ASTM C1017:	tipo II
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%):	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de alcalis (Na ₂ O equivalente) según EN 480-12 (%):	< 3,0

- desencofrantes **Mapeform Eco** y **DMA 1000** para el desmoldeado del hormigón de los encofrados;
- los curadores de la gama **Mapecure** para la protección de la rápida evaporación del agua de la mezcla de estructuras de hormigones no encofrado (pavimentaciones).

CONSUMO

Dosificación en volumen:

de 0,4 a 1,0 litros por cada 100 kg de cemento. Dosis diferentes de las recomendadas deben ser previamente verificadas mediante pruebas en hormigón y, de todos modos, previa consulta con la asistencia técnica MAPEI.

PRESENTACIÓN

Dynamon SR100 se suministra a granel, en bidones de 200 litros y cisternas de 1000 l.

ALMACENAMIENTO

Dynamon SR100 se conserva 12 meses en los recipientes cerrados y protegidos del hielo. La exposición directa a los rayos solares puede provocar una variación cromática, sin que esto perjudique de algún modo las características prestacionales del producto.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN Y LA APLICACIÓN EN OBRA

Dynamon SR100 no es peligroso en las indicaciones de las normativas actuales sobre

la clasificación de las mezclas. Se recomienda utilizar guantes y gafas protectoras y las habituales precauciones para la manipulación de productos químicos.

Para más información y detalles referente al uso correcto y seguro de nuestros productos, consultar la última versión de la Ficha de Seguridad.

PRODUCTO PARA USO PROFESIONAL.

ADVERTENCIA


Las indicaciones y prescripciones descritas arriba, deben de considerarse indicativas únicamente para ser comprobadas o confirmadas mediante aplicaciones prácticas y concluyentes. De este modo, es necesario la persona responsable determine si el uso de este producto es apropiado o no antes de ser aplicado y asumirá toda la responsabilidad que pudiera derivar de su uso.

Hacer referencia a la versión actualizada de la ficha técnica, disponible en la web www.mapei.com

Las referencias relativas a este producto están disponibles bajo solicitud y en la web de Mapei www.mapei.com



Anexo 23. Contenido de solidos Aditivo superplastificante Dynamon SR100. **Fuente:** Propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
	LABORATORIO DE MATERIALES				
	CANTIDAD DE SOLIDOS				
	MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado Maestria			LOTE	1
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Aditivo Superplastificante			MUESTRA	1
CLASIFICACION		FECHA	30/01/2020	HOJA No.	1 DE 1
ENSAYO					1
Masa de la arena de silice seca		g	28,42		
Masa del aditivo superplastificante		g	4,05		
Masa de la arena seca + masa del aditivo superplastificante (incluye peso de la tara)		g	63,41		
Masa seca de la mezcla entre arena y el aditivo superplastificante (incluye peso de la tara)		g	61,11		
% De solidos en el aditivo superplastificante			56,79%		