

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE AGREGADO GRUESO RECICLADO
SOBRE EL DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE CONCRETOS DE BAJA
(21 MPa), MEDIA (28 MPa) Y ALTA (35 MPa) RESISTENCIA**

Autores:

PAOLA A. MURILLO GRANOBLAS

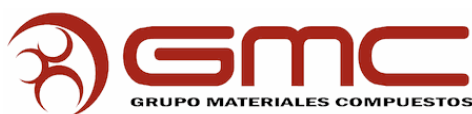
JULIANA POSADA VARGAS

Director:

Dr.Ing. RAFAEL A. ROBAYO SALAZAR

Codirector:

Ph.D. RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ



GRUPO MATERIALES COMPUESTOS – ESCUELA DE INGENIERÍA DE
MATERIALES

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DEL VALLE

CALI, VALLE DEL CAUCA

SEPTIEMBRE DE 2024

RESUMEN

La industria de la construcción es clave para el desarrollo social, esta genera grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD), principalmente concreto, siendo este el más usado en este ámbito; cabe mencionar que se generan impactos ambientales negativos durante su producción. En Colombia, existen diferentes normativas que exigen a los generadores de RCD su adecuado aprovechamiento y gestión para mitigar impactos ambientales, estableciendo metas de reciclaje.

En la actualidad, el concepto de sostenibilidad y economía circular son fundamentales para reducir el impacto ambiental y económico de los residuos. En este contexto, se busca reciclar y aprovechar los RCD, generando agregados reciclados provenientes del concreto, por lo cual es importante caracterizar el agregado grueso reciclado (AGR) y evaluar su desempeño físico-mecánico en nuevas mezclas de concreto.

En la actualidad, la NTC 6421 establece directrices para el uso de agregados reciclados, permitiendo solo un 20% de reemplazo en elementos estructurales, lejos de las metas de aprovechamiento establecidas en la Resolución 1257. En este estudio se realizó un proceso de caracterización de un AGR de resistencia conocida y se evalúa el efecto de la incorporación de este sobre el comportamiento físico y mecánico del concreto con diferentes niveles de resistencia (21, 28 y 35 MPa) y distintos porcentajes de sustitución de agregado reciclado (0%, 20%, 50% y 100%). Los resultados mostraron que el AGR presenta mayor porcentaje de volumen de poros, lo cual representa un aumento en su capacidad de absorción y menor resistencia al desgaste en relación con el AGN; independientemente del porcentaje de sustitución, se obtienen excelentes resultados en cuanto al desempeño fisicomecánico del concreto, concluyendo que, a pesar de las propiedades de los AGR, la incorporación de estos no afecta de manera significativa ninguna propiedad fisicamecánica del concreto, cumpliendo de esta manera con las propiedades de resistencia a compresión para uso estructural, resaltando que a la edad de 7 días de curado se alcanzaron resistencias hasta de 28 MPa y a los 28 días hasta 39 MPa.

Palabras clave: residuos de construcción y demolición (RCD); agregado grueso reciclado (AGR); desempeño físico y mecánico, resistencia a la compresión.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PROBLEMÁTICA	10
2.1. Formulación de la pregunta de investigación.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. Objetivo general	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1. Aspectos Normativos (ambientales y técnicos)	14
4.2. Residuos de construcción y demolición (RCD)	14
4.2.1. RCD aprovechables	14
4.2.2. RCD no aprovechables	15
4.3. Aplicaciones de los RCD en construcción	15
4.4. AGR	16
4.4.1. Características de los AGR	16
4.4.2. Macroestructura y microestructura.	16
4.4.3. Efectos sobre el concreto	16
4.4.4. Especificaciones de uso	17
4.4.5. Categorías de los AGR.....	17
4.5. Mortero adherido.....	19
4.6. Resistencia del concreto	19
4.7. Resistencia a la compresión	19
5. ESTADO DEL ARTE	21
5.1. Análisis bibliométrico	21
5.2. Antecedentes	24
6. METODOLOGÍA.....	28
6.1. Procesamiento y caracterización de los agregados	29
6.1.1. Gradación.....	31
6.1.2. Masa unitaria (suelta y compacta)	32
6.1.3. Impurezas orgánicas.....	33
6.1.4. Densidad, absorción y porosidad.	33
6.1.5. Contenido de humedad	35
6.1.6. Coeficiente de los Ángeles.....	35
6.2. Diseño y producción de las mezclas de concreto	36

6.2.1.	Mezclas	36
6.2.2.	Ensayos en estado fresco	37
6.3.	Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de concreto	37
6.3.1.	Ensayos mecánicos	37
6.3.2.	Ensayos físicos.....	38
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
7.1.	Procesamiento y caracterización de los agregados	43
7.1.1.	Gradación.....	44
7.1.2.	Masa unitaria (suelta y compacta)	45
7.1.3.	Impurezas orgánicas.....	47
7.1.4.	Densidad, absorción y porosidad	47
7.1.5.	Contenido de humedad	48
7.1.6.	Coeficiente de los Ángeles.....	49
7.2.	Diseño y producción de las mezclas de concreto	50
7.2.1.	Mezclas	53
7.2.2.	Ensayos en estado fresco	57
7.3.	Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de concreto	61
7.3.1.	Ensayos mecánicos	61
7.3.2.	Ensayos físicos.....	67
8.	CONCLUSIONES.....	77
9.	REFERENCIAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estadísticas de licencia de construcción.....	10
Figura 2. Análisis bibliométrico	21
Figura 3. Documentos por año.....	22
Figura 4. Documentos por país	23
Figura 5. Documentos por área temática	23
Figura 6. Patrones de grietas de las muestras.	24
Figura 7. Porcentaje de absorción de los especímenes en varios porcentajes de reemplazo de RCD.	25
Figura 8. Metodología.....	28
Figura 9. Curado de cilindros en laboratorio de control de mezclas	29
Figura 10. RCD.....	29
Figura 11. RCD utilizado (cilindros después de ensayo de resistencia a la compresión).....	30
Figura 12. Trituradora de mandíbula	30
Figura 13. Tamizado del RCD	31
Figura 14. Tamices.....	31
Figura 15. Prensa hidráulica.	38
Figura 16. Probetas de Succión Capilar.....	39
Figura 17. Ejemplo de gráfica de absorción.	40
Figura 18. Equipo Pundit Proceq utilizado para el ensayo de pulso ultrasónico.....	41
Figura 19. Ensayo de Pulso ultrasónico.....	41
Figura 20. Probetas prueba SEM.	42
Figura 21. MEB utilizado en la prueba SEM.....	42
Figura 22. Resistencia a la compresión de cilindros fuente AGR.	43
Figura 23. Ensayo de Impurezas orgánicas. Fuente. Propia.	47
Figura 24. Análisis granulométrico (AGN).	51
Figura 25. Análisis granulométrico (AGR-20%).....	51
Figura 26. Análisis granulométrico (AGR-50%).....	52
Figura 27. Análisis granulométrico (AGR-100%).....	52
Figura 28. Asentamientos.	59
Figura 29. Asentamientos de la mezcla de 350 kg/m ³	60
Figura 30. Asentamientos de la mezcla de 400 kg/m ³	60
Figura 31. Asentamientos de la mezcla de 500 kg/m ³	60
Figura 32. Resistencia a compresión, mezcla de 350 kg/m ³	62
Figura 33. Resistencia a compresión, mezcla de 400 kg/m ³	63
Figura 34. Resistencia a compresión, mezcla de 500 kg/m ³	63
Figura 35. Fallas de las muestras ensayadas a compresión.	67
Figura 36. Porcentajes de absorción del concreto en estado endurecido	68
Figura 37. Densidad aparente del concreto en estado endurecido	68
Figura 38. Porcentaje de volumen de poros del concreto en estado endurecido	68
Figura 39. Succión capilar, 350 kg/m ³	70
Figura 40. Succión capilar, 400 kg/m ³	70

Figura 41. Succión capilar, 500 kg/m ³	71
Figura 42. Velocidad de pulso ultrasónico	73
Figura 43. Macroestructura del concreto.	74
Figura 44. Microestructura del concreto.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Residuos sólidos aprovechables principales.	15
Tabla 2. Requisitos de contenido según la categoría del AGR.....	18
Tabla 3. Porcentajes de sustitución según la categoría.	18
Tabla 4. Requisitos de ensayos de los AGR.	19
Tabla 5. Distribución de tamices para AFN.....	32
Tabla 6. Distribución de tamices para AGR y AGN.	32
Tabla 7. Escala de color Gardner.	33
Tabla 8. Requisitos de estimación de masa mínima pasa D, A y P.	34
Tabla 9. Estimación de masa para Coeficiente de los Ángeles.....	36
Tabla 10. Gradación AGN.	44
Tabla 11. Gradación AGR.	44
Tabla 12. Gradación AFN.....	45
Tabla 13. Masa unitaria suelta AGR.....	45
Tabla 14. Masa unitaria compacta AGR.....	46
Tabla 15. Masa unitaria suelta AGN.....	46
Tabla 16. Masa unitaria compacta AGN.....	46
Tabla 17. Masa unitaria suelta AFN.	46
Tabla 18. Masa unitaria compacta AFN.	46
Tabla 19. D, A y P del AGR.	48
Tabla 20. D, A y P del AGN.....	48
Tabla 21. D, A y P del AFN.....	48
Tabla 22. Contenido de humedad AGN.....	49
Tabla 23. Contenido de humedad AGR.....	49
Tabla 24. Contenido de humedad AFN.	49
Tabla 25. Coeficiente de los Ángeles, AGR.	50
Tabla 26. Coeficiente de los Ángeles, AGN.....	50
Tabla 27. Diseño 350 - 0%.	53
Tabla 28. Diseño 350 - 20%.	53
Tabla 29. Diseño 350 - 50%.	54
Tabla 30. Diseño 350 - 100%.	54
Tabla 31. Diseño 400 - 0%.	54
Tabla 32. Diseño 400 - 20%.	55
Tabla 33. Diseño 400 - 50%.	55
Tabla 34. Diseño 400 - 100%.	55
Tabla 35. Diseño 500 - 0%.	56
Tabla 36. Diseño 500 - 20%.	56
Tabla 37. Diseño 500 - 50%.	56
Tabla 38. Diseño 500 - 100%.	57
Tabla 39. Resistencia a la compresión.....	61
Tabla 40. D, A y P en estado endurecido.....	67
Tabla 41. Tasa de absorción inicial.....	71

Tabla 42. Tasa de absorción secundaria.	72
Tabla 43. Resultados del ensayo de Pulso ultrasónico.	72
Tabla 44. Clasificación del concreto según la Velocidad ultrasónica.	73

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria de la construcción representa uno de los principales motores que impulsan el desarrollo y el progreso de la sociedad, lo que conlleva a un aumento en la cantidad de obras y renovaciones estructurales, produciendo cada vez más cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD). Debido a la calidad de las propiedades físicas y mecánicas en estado fresco y endurecido, el concreto es el material más usado a nivel mundial en el sector de la construcción, cabe mencionar que en el proceso de elaboración del concreto se presentan algunos impactos negativos en el medio ambiente durante toda su ejecución, es decir, desde la extracción de agregados finos y gruesos, hasta la cantidad de RCD que se pueden generar.

En la actualidad se cuenta con gran variedad de residuos sólidos que se pueden reciclar y reusar, uno de ellos son los RCD, los cuales se clasifican en dos grupos, el primero y al que pertenecen estos residuos son considerados sólidos aprovechables principales y el segundo como sólidos aprovechables secundarios [1]. Teniendo en cuenta lo anterior, cabe mencionar que para los generadores de estos residuos según la resolución 1257 del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia, se han establecido metas u obligaciones; el artículo 19 establece que los generadores de RCD deben hacer un aprovechamiento adecuado de un porcentaje de los escombros producidos en obra conforme a la clasificación de la categoría en la que se encuentra el municipio donde se lleva a cabo, con el fin de mitigar las consecuencias ambientales que puedan provocar el mal manejo de estos[2].

Según lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que los conceptos de sostenibilidad y economía circular en la actualidad han adquirido mayor importancia para la sociedad y el sector industrial, es de suma importancia tener en cuenta los impactos ambientales y económicos que se generan, por tal motivo se está en la constante búsqueda de soluciones y estrategias para aprovechar de manera consciente los RCD y lograr reducir considerablemente la generación de desechos a través de actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

Entre los RCD aprovechables se encuentran los residuos de concreto, a partir de los cuales es posible la producción de agregados reciclados (finos y gruesos). Al respecto, el uso de agregados reciclados en Colombia es limitado, debido en gran parte a la falta de conocimiento sobre el efecto de su incorporación en nuevas mezclas de concreto. Recientemente, la NTC 6421 brinda un respaldo desde el punto de vista técnico sobre las características que deben cumplir los agregados reciclados de concreto y los límites de sustitución de agregado grueso natural por reciclado dependiendo del tipo de elemento a diseñar (estructural o no-estructural). A pesar de la existencia de esta norma técnica, los límites de reemplazo son aún conservadores para elementos estructurales, limitando el uso de agregados reciclados en un 20%, porcentaje muy alejado a las metas de aprovechamiento establecidas por la Resolución 1257. Esto puede ser debido a que el efecto del uso de agregados reciclados es variable y depende de la calidad del concreto de origen, es decir, aquel que se use como material de partida para la trituración de los agregados reciclados y su comparación con la calidad del concreto nuevo. En este sentido, el presente trabajo de grado tiene como finalidad evaluar el comportamiento físico y mecánico de concretos de 21 MPa, 28 MPa y 35 MPa, los que para este trabajo de grado corresponden a niveles de resistencia de baja, media y alta resistencia, con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de agregado reciclado. El factor diferencial de esta investigación se centra en que la resistencia del concreto de partida es conocida, siendo este valor una referencia de la calidad del concreto viejo vs. el nuevo.

2. PROBLEMÁTICA

Los residuos de construcción y demolición (RCD), son materiales inertes que se generan durante las etapas de construcción, demolición o renovación de edificaciones, obra civil, espacio público, entre otros; generalmente están compuestos principalmente por concreto, ladrillos, cerámicos, madera, metales y plásticos.

Actualmente la construcción es uno de los sectores más relevantes para la sociedad ya que está directamente relacionado con el concepto de desarrollo de esta, a pesar de ser una actividad que se ejecuta constantemente y a gran magnitud, los avances respecto al impacto ambiental que genera, son pocos. En los últimos años y debido a la conciencia ambiental que progresivamente va tomando auge, la propuesta por mitigar el impacto producido por el hombre, ha incentivado el evaluar las problemáticas que se generan debido a los procesos llevados a cabo en este sector, y por esto mismo, a estudiar y encontrar posibles soluciones a estas problemáticas ambientales.

En Colombia, según los datos recopilados por el DANE (ver Figura 1), en marzo del 2022 se licenciaron 2.242.414 m² para construcción, 461.237 m² más que en el mismo mes del año anterior en el cual se licenciaron 1.781.177 m², lo que significó un aumento de 25.9% en el área licenciada. Este resultado se explica por el incremento de 151.3% en el área aprobada para los destinos no habitacionales y de 8.8% para vivienda[3] .

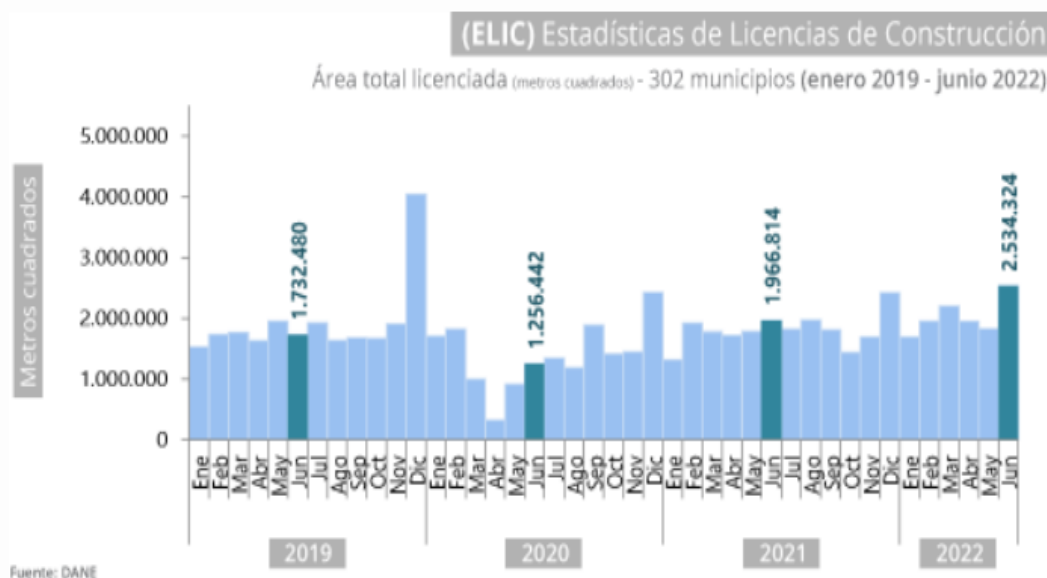


Figura 1. Estadísticas de licencia de construcción.
Fuente: Informes del DANE

Resultados estadísticos evidencian que se alcanzó una producción de 6.311,7 miles de metros cúbicos de concreto premezclado en el periodo marzo 2021 - febrero 2022, teniendo una variación total del 23,6% respecto del periodo marzo 2020- febrero 2021. La producción de concreto premezclado contribuye a diferentes áreas, tales como, vivienda, edificaciones, obras civiles, entre otros; de los mencionados, el sector vivienda es el que presentó mayor variación respecto al periodo anterior, siendo esta de un 41,8%, la cual aportó 20,9 puntos porcentuales a la variación total [3].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente el incremento en los RCD es proporcional al incremento de producción del concreto, adicionalmente, tomando como referencia las cifras

brindadas por el DANE de concreto premezclado, se puede deducir que en el periodo de marzo 2021 – febrero 2022 se extrajeron 3.534,5 miles de m³ de arena de los ríos y 5.301,8 miles de m³ de grava de las canteras [3]. En Colombia se produce alrededor de 22 millones de RCD, entre las principales ciudades generadoras de estos residuos anualmente está Bogotá, la cual produce alrededor de 12 millones de m³, Medellín con 860.000 m³, Cartagena que genera 190.000 y para Cali, 1 millón de m³ [4], [5]. Haciendo un análisis de lo mencionado previamente, el sector de la construcción genera grandes consecuencias negativas respecto al medio ambiente, tales como la extracción y el uso de materiales naturales, posibles contaminaciones de las fuentes hídricas, desequilibrio del suelo por su ocupación para el vertido de los desechos y la pérdida de calidad de este mismo, también se observa daño paisajístico en los entornos naturales y urbanos por el vertimiento.

Dando solución a estas problemáticas y teniendo en cuenta que los residuos de construcción y demolición cuentan con un alto potencial para ser reutilizados, se buscan formas de implementarlos en nuevos proyectos de construcción; actualmente en Colombia existen decretos y normas que regulan el uso y manejo de los RCD, tales como el decreto 0771 de 2018 para la ciudad de Cali, el cual establece lineamientos para el control de la gestión de los RCD [6]. La Resolución 472 de 2017 modificada por la Resolución 1257 de 2021 donde se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición [2]. La NTC 6421 (Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico), la cual establece requisitos de calidad y orienta sobre el uso de agregados gruesos reciclados en el concreto hidráulico [1] y la NTC 6422 (Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados) donde se especifican métodos para seleccionar y clasificar los tipos de RCD [7] y así poder usarlos como agregados.

En la actualidad se han realizado investigaciones que tiene como objetivo caracterizar los agregados gruesos reciclados y evaluar el efecto de su incorporación en las mezclas de concreto para darle un aprovechamiento a los RCD, en la mayoría de estas investigaciones no se conoce la resistencia del RCD del que provienen los AGR y han obtenido óptimos resultados que dan cumplimiento a lo establecido en la NTC 6421 [1] la cual indica que el porcentaje de sustitución máximo para concretos estructurales es del 20%.

Teniendo en cuenta que la resistencia promedio del concreto con la que se trabaja en Colombia es de 24 MPa [8], y que el concreto puede estar conformado entre 65 y 70% por agregados naturales, los cuales tienen como objetivo reducir los costos de la mezcla y aportar resistencia, la problemática que se busca abarcar con este trabajo de grado es evaluar cómo influye la incorporación del agregado grueso reciclado de resistencia conocida en las características físico-mecánicas de concretos de baja (21 MPa), la cual se utiliza principalmente en edificaciones de hasta dos pisos, media (28 MPa), usado para construcciones residenciales o comerciales, y alta resistencia (35 MPa), usada para elementos estructurales con altas exigencias mecánicas como puentes, edificaciones esbeltas, entre otros. Se emplearan sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de agregado grueso reciclado (AGR) para cada resistencia analizada; el concreto con sustitución del 0% equivale a un concreto estructural con 100% de agregado grueso natural, 20% de sustitución es el valor máximo a utilizar que actualmente es recomendado en concretos estructurales según la NTC 6421[1], y la sustitución de un 50% y 100% busca demostrar que es posible diseñar un concreto estructural en donde la resistencia sea óptima y el porcentaje de uso de agregados gruesos naturales pueda ser nulo sin generar disminuciones significativas en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

2.1. Formulación de la pregunta de investigación.

¿Cómo influye el uso de agregado grueso de concreto reciclado en el comportamiento físico-mecánico de concretos de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta (35 MPa) resistencia?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la incorporación de un agregado grueso reciclado (AGR) de resistencia conocida sobre el desempeño fisicomecánico de concretos de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta (35 MPa) resistencia.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar una muestra de AGR de acuerdo con las Normas Técnicas Colombianas para su uso en mezclas de concreto.
- Diseñar y producir concretos de 21, 28 y 35 MPa de resistencia a la compresión (28 días) con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% del AGR caracterizado.
- Evaluar el comportamiento fisicomecánico de los concretos elaborados con AGR de resistencia conocida.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Aspectos Normativos (ambientales y técnicos)

En Colombia las primeras normas que fueron expedidas en búsqueda de la protección medioambiental se consagraron en el artículo 79 de la constitución política de 1991 donde se establecieron también deberes y obligaciones respecto al medio ambiente, posterior a eso, se estableció la Resolución 0472 de 2017[9], la cual fue modificada por la actual Resolución 1257 de 2021 [2] donde se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición lo cual es uno de los motivos principales que incentivan el desarrollo de este proyecto, se han desarrollado otras normativas tales como la NTC 6421 [1] y NTC 6422 [7] que buscan implementar el uso de los RCD como reemplazo de los agregados naturales con la finalidad de disminuir el impacto ambiental generado por estos residuos, y así mismo disminuir la demanda de agregados naturales, contribuyendo a ejecutar una economía circular donde se busca darle un nuevo uso a los residuos sólidos aprovechables, en este caso los RCD.

En la ciudad de Cali con el fin de promover prácticas de construcción sostenibles, se estableció el decreto 0771 del 2018[6], el cual fue actualizado en el 2023[10], donde menciona las obligaciones que deben cumplir los pequeños y grandes generadores de RCD, algunas de estas son: no ocupar espacios públicos, almacenar y clasificar los materiales de construcción y RCD de manera correcta para evitar una afectación ambiental, entregar los RCD a transportadores aprobados por el DAGMA y asegurarse de que los residuos sean depositados en un lugar autorizado por la autoridad competente; para los grandes generadores, también se establecen requisitos más estrictos, tales como permisos, licencias y metas de aprovechamiento; en este decreto también se especifica las obligaciones de los transportadores, plantas de aprovechamiento y receptores finales de los RCD, esto con el fin de implementar un proceso de reciclaje y aprovechamiento funcional. Adicionalmente, en el 2022 se presentó la propuesta de un Manual de Construcción Sostenible para la ciudad de Cali, el cual consta de 120 criterios que buscan incentivar e implementar procesos de construcción amigables con el medio ambiente, proponiendo la posible obtención de incentivos que ofrecen diferentes beneficios; a estos incentivos se accede de manera voluntaria, estos se denominan “Sello Cali construye sostenible” [11].

4.2. Residuos de construcción y demolición (RCD)

Según la NTC 6421, RCD son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras de obras civiles o de otras actividades relacionadas [1].

Los RCD se dividen en dos tipos, los cuales se mencionan a continuación.

4.2.1. RCD aprovechables

- Productos de excavación, demolición y sobrantes de alguna construcción en buen estado y no contaminados.
- Pétreos: concreto, agregado grueso y fino, ladrillo, asfalto, etc.
- No pétreos: metales tales como el acero, aluminio, cobre, hierro, plásticos, vidrio, etc.

En el caso de este trabajo de investigación y dejando por fuera los materiales de excavación, los RCD aprovechables se clasifican en dos grupos, el primero son los residuos sólidos aprovechables principales en el concreto hidráulico, los cuales son la mayor proporción de los constituyentes de los AGR y se agrupan según la *Tabla 1*.

*Tabla 1. Clasificación de Residuos sólidos aprovechables principales.
Fuente. NTC 6421.*

Componente	Descripción
Rc	- Residuos de concreto. - Residuos de productos de concreto - Residuos de mortero - Residuos de unidades de mampostería de concreto
Ru	- Agregados ligados hidráulicamente - Agregados no ligados - Piedra natural
Rb	- Residuos de mampostería de arcilla (ladrillos y tejas) - Unidades de mampostería de silicato de calcio - Concreto permeable no flotante - Residuo de material cerámico

El segundo grupo se conforma de los residuos sólidos aprovechables secundarios, estos conforman una pequeña proporción de los componentes de los AGR ya que no es posible separarlas por completo de los residuos aprovechables principales y no aportan a las propiedades del concreto.

4.2.2. RCD no aprovechables

- RCD con características peligrosas o contaminados con residuos peligrosos.
- RCD en estado deficiente para su aprovechamiento.

4.3. Aplicaciones de los RCD en construcción

Las aplicaciones de los agregados reciclados en construcción pueden ser tan amplias y útiles como las de los agregados naturales, esto teniendo en cuenta de donde provienen y el buen manejo que se les dé; en la composición del concreto, estos se pueden utilizar como agregados, sustituyendo a los agregados naturales; otras aplicaciones son: acondicionamiento de terrenos, ejecución de terraplenes, relleno de zanjas, pavimentos, etc.

4.4.AGR

El agregado grueso reciclado consiste en partículas provenientes de la trituración de RCD, en su estructura se pueden encontrar fracciones de agregado natural donde en su mayoría de veces contiene una parte de cemento, agua y arena adherido proveniente de la antigua mezcla, es decir, mortero adherido; cabe mencionar que, agregado grueso es aquel que es retenido 100% en el tamiz N°4 o superior.

4.4.1. Características de los AGR

- Físicas

Los agregados reciclados suelen tener formas más angulares y texturizadas; debido a la presencia del mortero adherido y contenido de vacíos, generalmente estos presentan una mayor absorción de agua y menor densidad que los agregados naturales.

- Mecánicas

Los AGR se caracterizan por tener menor resistencia a la compresión y abrasión en relación con los AGN; lo que puede influir en la durabilidad del concreto.

4.4.2. Macroestructura y microestructura.

- Macroestructura

Los AGR presentan mayor heterogeneidad debido a la mezcla de materiales de diferentes fuentes, adicionalmente suele presentar una superficie más porosa y rugosa que puede conllevar a una mejor adherencia del mortero, pero por esta misma característica se puede presentar un incremento en la absorción.

- Microestructura

El agregado reciclado presenta mayor porosidad debido al mortero adherido y a los vacíos internos presentes en la matriz, adicionalmente se puede presentar una transición entre el agregado grueso reciclado y el nuevo mortero menos cohesiva comparado con los agregados de origen natural, característica que afecta la resistencia y durabilidad del concreto.

4.4.3. Efectos sobre el concreto

- Estado fresco

Al incorporar AGR en las mezclas de concreto es importante controlar el contenido de agua para tener una buena consistencia debido a que los AGR tienden a presentar mayor absorción de agua lo que puede generar que la trabajabilidad de la mezcla sea menor.

- Estado Endurecido

En el estado endurecido del concreto se presenta una disminución generalmente en la resistencia a la compresión y tracción en comparación con aquel que se realiza con agregados naturales, otro de los aspectos que se puede ver alterado es la durabilidad ya que al tener mayor intercomunicación entre poros y presencia de estos es más vulnerable especialmente en ambientes agresivos. Sin embargo, los efectos negativos o positivos dependerán de la calidad del AGR con respecto al agregado natural. Un AGR proveniente de un concreto de alta resistencia incorporado en concretos de resistencia normal probablemente no tendrá ningún efecto negativo en cuanto a su desempeño mecánico. En contraste, un AGR proveniente de un concreto de baja resistencia incorporado en concretos de resistencia normal o alta, tendrá un efecto negativo sobre el comportamiento mecánico.

4.4.4. Especificaciones de uso

Las especificaciones de uso de los AGR pueden variar según la procedencia y estado de los RCD; también dependerá de los requisitos del proyecto y normativas de acuerdo con el uso que se le quiera dar al concreto.

4.4.5. Categorías de los AGR

Las categorías que conforman los AGR según la NTC 6421 [1] son las siguientes:

T_1 = AGR fundamentalmente de concreto, óptimo para uso estructural y no estructural.

T_2 = AGR mixtos conformados por concreto, mampostería de arcilla y material cerámico, este agregado es considerado óptimo para uso no estructural.

Estas categorías deben cumplir con unos requisitos mínimos y máximos de residuos sólidos aprovechables principales y secundarios indicados en la *Tabla 2* los cuales son medidos como porcentaje del peso total.

Los residuos sólidos aprovechables principales en el concreto hidráulico son la mayor proporción de los constituyentes de los AGR [1]; a continuación se especifican.

R_c = Residuos de concreto, productos de concreto, mortero, mampostería de concreto, etc.

R_u = Agregado natural, agregados ligados hidráulicamente, agregados no ligados, etc.

R_b = Residuos de material cerámico, mampostería de arcilla, mampostería de silicato de calcio, concreto permeable no flotante, etc.

A continuación se presentan los residuos sólidos aprovechables secundarios, los cuales son la menor proporción de los constituyentes de los AGR [1].

R_a = Residuos de material asfáltico.

FL = Materiales de construcción liviana como residuos de cartón, Drywall o similares que contengan yeso, etc.

X = Materiales metálicos magnéticos y no magnéticos, plástico y caucho no flotante, materiales químicamente contaminados, residuos de materia orgánica, etc.

Rg = Residuos de vidrio.

Tabla 2. Requisitos de contenido según la categoría del AGR
Fuente. NTC 6421.

Categoría	Porcentaje de material medido según el peso			
	Rc + Ru	Rb	Ra	X + Rg + FL
T_1	mín 92	máx 5	máx 1	máx 2
T_2	mín 70	máx 30	máx 1	máx 2

De la *Tabla 2* podemos concluir que los T_1 , los cuales serán los utilizados en este proyecto de grado, deben tener un porcentaje mínimo del 92% de residuos de concreto o agregados naturales, permite un valor máximo del 5% de materiales cerámicos o de mampostería, un 1% de residuos asfálticos y un 2% de materiales como metales, vidrios, etc.

Según esta norma [1], también se establecen algunos porcentajes recomendados de sustitución, los cuales varían de acuerdo con la clasificación de los AGR recomendadas para las categorías de uso tal como se detalla en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Porcentajes de sustitución según la categoría.
Fuente. NTC 6421.

Categoría	Elementos estructurales		Elementos no estructurales	
	F'c (MPa)	% de sustitución	F'c (MPa)	% de sustitución
T_1	máx 35	máx 20	máx 21	máx 100
T_2	—	—	máx 21	máx 100

En la *Tabla 3* se expresa que los T_1 , en elementos estructurales el porcentaje máximo a utilizar es del 20% y la resistencia máxima requerida es de 35 MPa; para los AGR T_1 y T_2 , en elementos no estructurales, el porcentaje de sustitución máxima a utilizar es del 100% con una resistencia requerida de 21 MPa.

Para controlar la especificación según la categoría de uso es necesario tener en cuenta los requisitos mínimos que los AGR deben cumplir, los cuales se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Requisitos de ensayos de los AGR.
Fuente. NTC 6421.

Categoría	Absorción (%)	Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	Partículas fracturadas mecánicamente (%)	Índice de aplanamiento (%)	Índice de alargamiento (%)
T_1	máx 7	máx 50	mín 60	máx 25	máx 25
T_2	máx 5	máx 50	mín 60	máx 25	máx 25

Los requisitos de ensayo para los AGR T_1 y T_2 son los mismos para la mayoría de ensayos a realizar, excepto por el porcentaje de absorción; para los T_1 es permitido un 7% y para T_2 un 5%.

4.5. Mortero adherido

Se refiere a la fracción de mortero viejo (pasta+agregado fino natural) que permanece adherido a los agregados debido a que no se desprendieron completamente en el proceso de trituración del concreto original, el cual influye directamente en aspectos como la densidad, absorción, resistencia, durabilidad, etc., debido que contiene mayor cantidad de poros en su estructura.

4.6. Resistencia del concreto

La resistencia mecánica del concreto en estado endurecido depende de numerosas y complejas variables como la composición química de cemento, su finura, la relación agua-cemento, la calidad intrínseca de los agregados tanto finos como gruesos, las condiciones de temperatura y humedad del ambiente. Por su naturaleza el concreto es un material discontinuo y heterogéneo que arroja resultados variables en cuanto a su calidad y resistencia, debido a la compleja interacción de sus fases constituyentes como la resistencia de la pasta hidratada (generalmente llamada matriz), la resistencia individual de las partículas del agregado y la relación existente entre la interfaz matriz-agregado[12].

4.7. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una característica mecánica principal del concreto. También se puede definir como la capacidad que tiene el concreto para soportar una carga en un área determinada, por lo que se representa en términos de esfuerzo, en su mayoría de veces en kg/cm², MPa y lb/in² (Psi).

El ensayo comúnmente sirve para determinar la resistencia a la compresión, este se realiza sobre probetas cilíndricas de aproximadamente 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las normas NTC 550 y 673 son las que rigen los procedimientos aceptados para la fundición de los cilindros y ensayo de resistencia a la compresión respectivamente [13].

Esta propiedad es importante en este proyecto teniendo en cuenta que se analizarán concretos estructurales los cuales deben cumplir una resistencia establecida, la cual se puede ver levemente afectada en función de los porcentajes de sustitución de AGR debido a sus características.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1. Análisis bibliométrico

A partir de un análisis de 10.231 documentos los cuales se seleccionaron en un margen de tiempo entre el año 2000 y el 2023, como resultado de un filtro para obtener solo documentos y resúmenes pertenecientes al área de ingeniería en torno al tema de residuos de construcción, los cuales se recopilaron de la base de datos Scopus con ayuda del software VOSviewer, se realizó un análisis de co-ocurrencias con un motor de búsqueda sobre agregados reciclados y concreto reciclado, residuos de construcción y demolición y agregado grueso reciclado.

En la *Figura 2* se puede observar gráficamente la relación que existe alrededor de los artículos y los cinco clústeres importantes, los cuales están diferenciados por colores, el lila representa cómo se vinculan los documentos recopilados con temas relacionados a las mezclas de concretos, asfaltos y pavimentos, entre otros. Por otra parte, el color rojo representa todos los vínculos respecto a la construcción, concreto, construcción y demolición, así como el desarrollo sustentable. Algunas palabras alrededor de las mezclas, como durabilidad, mortero, geopolímeros, cemento y curado, se representan en color azul. También, en color amarillo, se evidencian palabras más relacionadas con las propiedades del concreto, como resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión. Por último, el color verde contiene temas relacionados con los agregados reciclados, agregados de concreto, reciclaje y concreto reciclado, los cuales son temas que realizan el mayor aporte a este documento, presentando mayor co-ocurrencias en este análisis y, por ese motivo, son los que mayor tamaño.

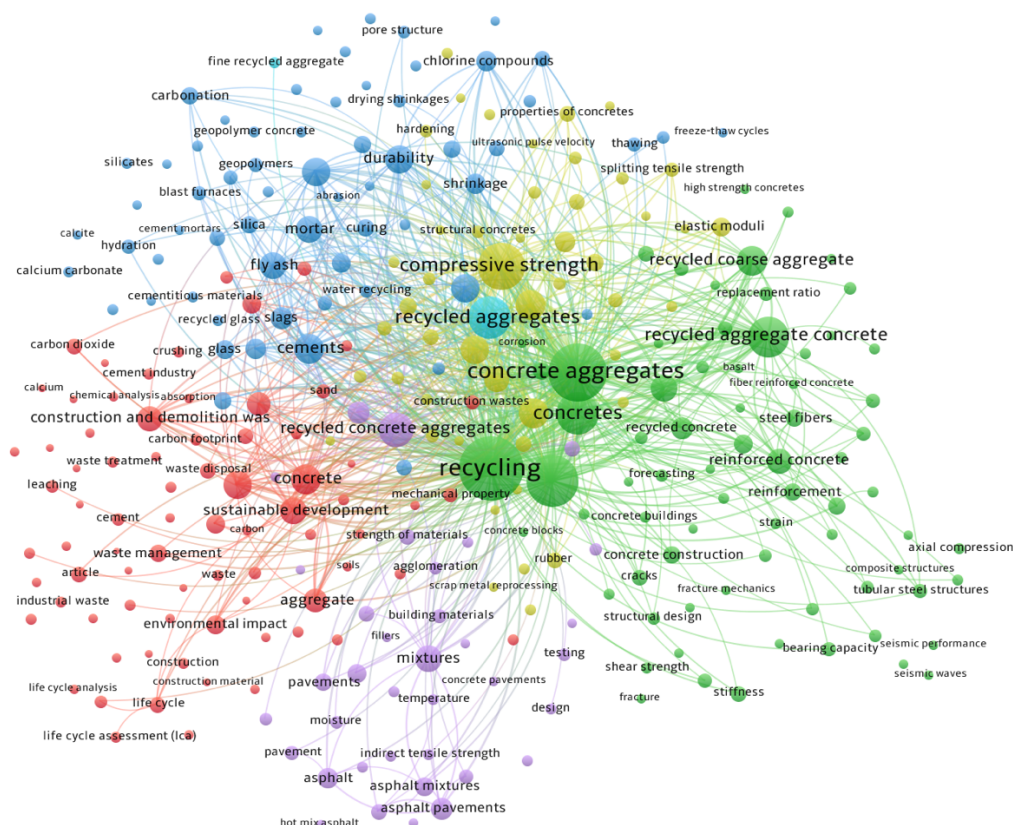
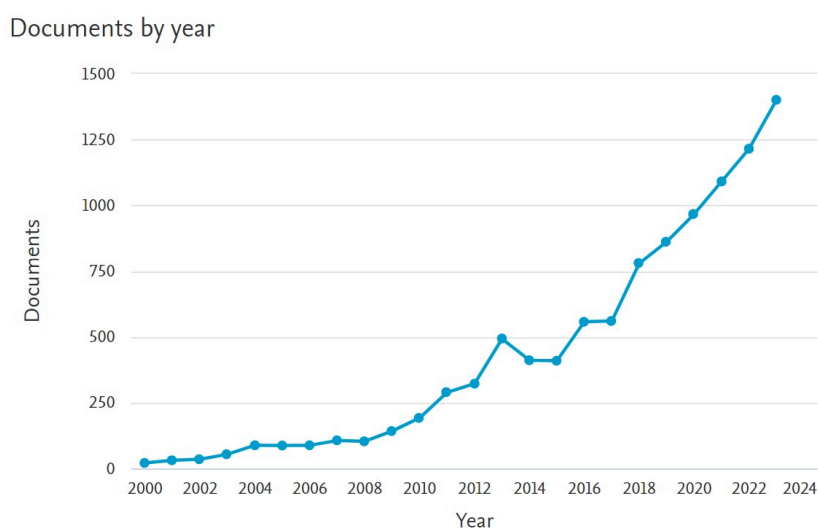


Figura 2. Análisis bibliométrico
Fuente. VOSviewer

Actualmente, es evidente a nivel global la necesidad de darle un buen manejo a los residuos con la finalidad de lograr disminuir el impacto ambiental que generan considerando que, debido a la contaminación del ser humano, se ha alcanzado un punto de no retorno donde el daño ocasionado al medio ambiente en diferentes sectores ya es irremediable en su totalidad. A nivel mundial, el interés por el correcto manejo de los residuos sólidos, específicamente los RCD, ha incrementado, generando un aumento de investigaciones en busca de una solución que permita darle nuevamente vida útil a estos residuos como agregados reciclados con el objetivo de sustituir los agregados naturales, teniendo en cuenta los cambios que se pueden generar en las propiedades mecánicas con esta sustitución.

En la *Figura 3* se puede evidenciar el continuo crecimiento de investigaciones y se observa que el año en el que se han presentado una mayor cantidad de trabajos respecto a los AGR es el 2023.



*Figura 3. Documentos por año.
Fuente. Scopus*

En países más desarrollados el interés investigativo en este ámbito es notoriamente mayor que en Colombia como se evidencia en la *Figura 4*, siendo China el principal país que muestra gran aporte en los estudios, no obstante, estas investigaciones pueden brindar información importante, sin embargo, debido a que las normas de cada país se rigen según sus necesidades debido a sus zonas sísmicas, estratos, agregados naturales, entre otros, hace que el análisis investigativo no sea óptimo para las condiciones de construcción en Colombia y que en el país se vea cada vez más necesario realizar investigaciones locales para darle cumplimiento a la normativa Colombiana enfocada en el uso de RCD y dar soluciones al manejo de estos residuos.

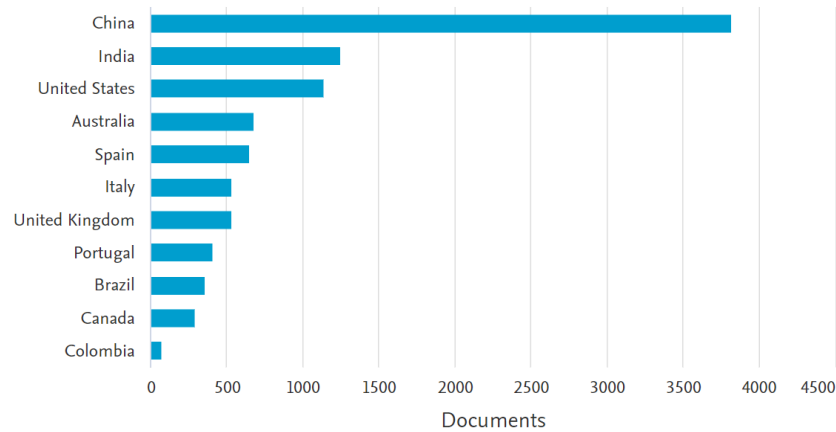


Figura 4. Documentos por país
Fuente. Scopus

En la actualidad es notorio el incremento en los avances investigativos acerca de la implementación de los RCD en el diseño y producción del concreto, como se observa en la *Figura 5* el sector de la ingeniería es el que tiene mayor porcentaje de investigación respecto al tema, lo que quiere decir que la necesidad de implementar estos residuos como agregados en la construcción genera la constante investigación para determinar así los correctos métodos de caracterización y manejo de estos.

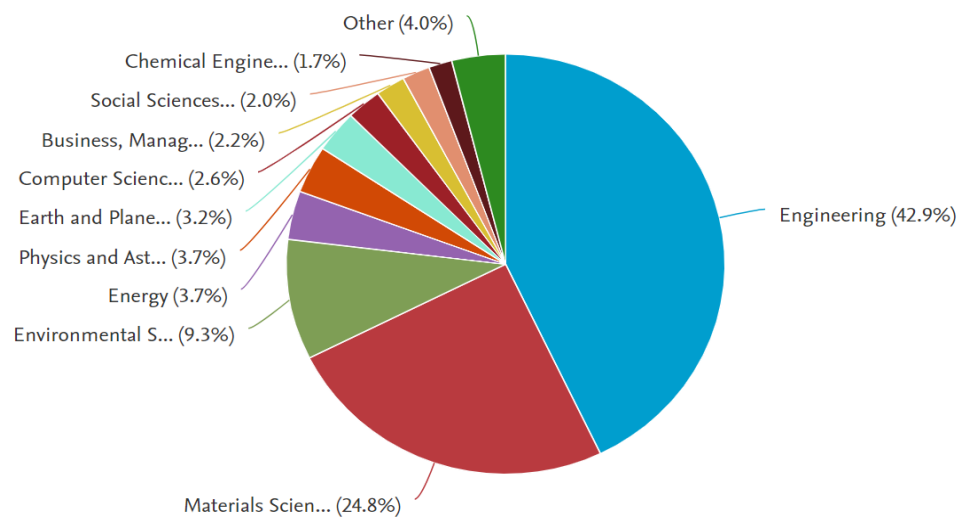


Figura 5. Documentos por área temática
Fuente. Scopus

5.2. Antecedentes

Con el fin de realizar el estudio y aplicar métodos pertinentes para el uso de RCD en nuevos agregados, se realizó la búsqueda de algunos estudios previos al proyecto.

- **Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012). *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*:**

El objetivo de este trabajo es analizar el uso de los agregados gruesos reciclados en nuevos concretos, brindar información sobre los efectos de la durabilidad y encontrar un método de diseño adecuado para el uso de los RCD; en este proyecto se evaluaron parámetros como la resistencia a la compresión, la velocidad de pulsos ultrasónicos, la contracción, la absorción del agua y la permeabilidad intrínseca.

Los resultados demostraron que los RCD presentan una buena velocidad ultrasónica, una baja absorción de agua y baja permeabilidad intrínseca, la resistencia deseada se alcanzó incluso cuando el 80 % del contenido del agregado grueso se sustituyó por RCD. El diseño de la mezcla se realizó mediante el método estadístico DoE, el cual permite evaluar las diferentes alternativas en un diseño para optimizar los procesos y llegar a unos resultados óptimos; este estudio tenía como objetivo obtener una resistencia de 25 MPa a los 28 días para 5 tipos de mezclas, las cuales se diferencian por la cantidad de RCD sustituido en el agregado grueso del 0, 15, 30, 60 y 80%.

Todas las pruebas realizadas a los testigos se realizaron bajo la normativa británica. En los resultados se encontró que al aumentar el porcentaje de sustitución de los agregados gruesos la resistencia a la compresión se ve afectada directamente, entre todas las muestras la que mejor desempeño tuvo fue el concreto normal, seguido del 15, 30, 60 y 80%, como se nombró anteriormente los resultados indican una tendencia decreciente en la resistencia a la compresión hacia un nivel alto de contenido de RCD.

La relación inversa entre el contenido de RCD y la resistencia a la compresión se debe a la mala calidad del mortero adherido que ha sufrido en el proceso de trituración y que ha creado las zonas de debilidad en el hormigón.



Figura 6. Patrones de grietas de las muestras.

Fuente. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012).

También concluyen que la fracción óptima de sustitución es hasta un 30% para la mezcla ya que no se presenta una reducción significativa en la resistencia.

Finalmente, concluye que la cantidad de sustitución de agregado grueso reciclado afecta la resistencia a la compresión, sin embargo, por medio del diseño de la mezcla DoE, es posible una sustitución de hasta el 80% para una resistencia aceptable; a medida que se aumenta la sustitución del agregado grueso, aumenta su porosidad lo que lleva a deducir

que el valor de la absorción de agua es proporcional a la cantidad de agregado sustituido en la mezcla como se observa en la *Figura 7*. [14]

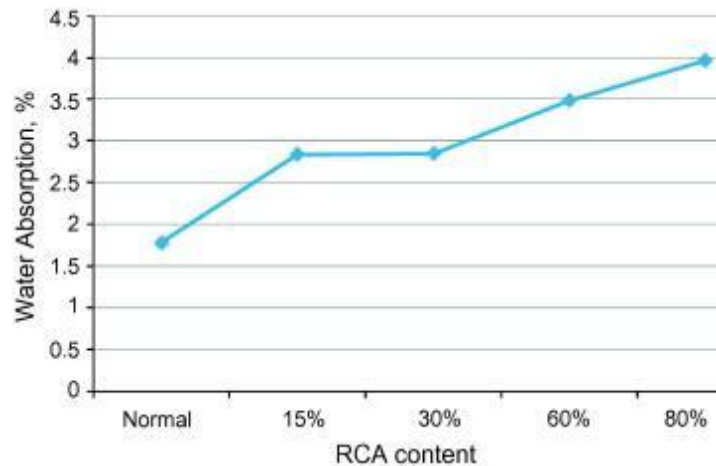


Figura 7. Porcentaje de absorción de los especímenes en varios porcentajes de reemplazo de RCD.
Fuente. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012).

- **Daniela Ramírez Picado (2022). Evaluación del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos:**

En esta investigación se buscó caracterizar el comportamiento físico y mecánico de agregado grueso reciclado proveniente de tres diferentes fuentes: muros de mampostería, elementos prefabricados y concreto colado en sitio; se hicieron sustituciones del 30, 50 y 100% de AGN por AGR y se comparó su comportamiento respecto un concreto convencional; de este análisis se obtuvo:

- En la sustitución del 30% de AGR de las tres diferentes mezclas, la prueba de resistencia a compresión presenta resultados similares a los resultados obtenidos en el concreto convencional.
- Al incrementar el porcentaje de AGR, la resistencia disminuye, pero, los resultados continúan cumpliendo con las condiciones de diseño, siendo estas superiores a 210 Kg/cm².
- Al caracterizar los agregados reciclados se presentan valores superiores respecto a los agregados naturales en el contenido de humedad y absorción. [15]

- **Robayo Salazar, R. A., Matthey Centeno, P. E., Silva Urrego, Y. F., & Delvasto Arjona, S. (2014). "Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado"**

Esta investigación evalúa el efecto de la sustitución parcial y total de los agregados naturales por agregados reciclados sobre el comportamiento en estado fresco y endurecido de un concreto autocompactante.

Los agregados fueron obtenidos a partir de la trituración de RCD proveniente de actividades de demolición en la Universidad del Valle (Cali-Colombia), en esta investigación se obtuvo que el incorporar agregados reciclados no se ve afectado el comportamiento en estado fresco de las mezclas, pero si influye en el comportamiento en estado endurecido afectando su resistencia, mostrando una disminución entre el 15 y el 29 %, adicionalmente se ve un aumento en la porosidad en función de la cantidad de agregado natural que fue reemplazado por el agregado reciclado (25, 50, 75 y 100 %).

Finalmente, se concluyó que la incorporación de los agregados reciclados provenientes de la trituración de escombros para la producción de concreto, como sustituto parcial o total del agregado natural resulta adecuado, ya que la mezcla en estado fresco presenta un flujo apropiado, con una buena resistencia a la segregación, exudación y excelente capacidad de paso y de relleno; por otro lado, se vio que la incorporación de estos agregados generó una ligera disminución de las propiedades en estado endurecido respecto a la mezcla de referencia, de manera proporcional a la cantidad de agregado reciclado presente en las mezclas. Cabe resaltar que el concreto que presentó mejor comportamiento mecánico corresponde al porcentaje de sustitución de RCD del 25% de agregado, arrojando un desempeño mecánico con relación a la mezcla de referencia de un 85% [16].

- **Carlos Bedoya, Luis Dzul (2015). *El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana.***

Este proyecto busca la elaboración de un concreto haciendo uso de agregados reciclados obtenidos de la valorización de escombros de concreto y mampostería, los cuales se usaron como sustitución de agregado grueso y agregado fino, respectivamente. Las sustituciones de agregados naturales por agregados reciclados se realizaron en porcentajes del 25, 50 y 100 % y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Haciendo sustitución del 25% de agregado reciclado se puede observar que la resistencia a la compresión presenta disminuciones no mayores a un 3% respecto al concreto convencional, por lo que no se consideran significativas; según lo anterior se considera que esta mezcla es la más óptima para la elaboración de un concreto estructural.
- En los resultados obtenidos de la prueba de carbonatación, el cual es un ensayo que ayuda a determinar la durabilidad de una estructura, se obtuvo para una edad de 27 años y cuatro meses resultados máximos de profundidad inferiores a 20 mm que es lo establecido por la literatura técnica y científica, siendo estos 12,4 mm y 9,1 mm para las mezclas con el 50 % y 100% de sustitución respectivamente; la mezcla de referencia obtuvo 8,4 mm de profundidad.
- Se concluye según los resultados obtenidos que las diferentes sustituciones son apropiadas para ser utilizadas en la elaboración de un concreto de uso no estructural; La mezcla del 25 % de sustitución si es considerada óptima para la elaboración de un concreto estructural.
- Las mezclas elaboradas con agregados reciclados presentan costos similares con la mezcla de referencia[17].

- **Krveziu, D., Selmani, F., Mujaj, A., Kondi, I. (2023). Recycled Concrete Aggregates: A Promising and Sustainable Option for the Construction Industry.**

Con el objetivo de reducir el uso de materiales vírgenes, como los agregados naturales, esta investigación promueve el empleo de residuos de construcción y demolición en lugar de los materiales naturales. Se llevó a cabo un estudio experimental utilizando varias mezclas de concreto para evaluar el impacto del uso de RCD en lugar de agregados naturales en las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido. El principal objetivo es cumplir con uno de los principios de la economía circular, que consiste en reducir la huella de carbono mediante el reciclaje de residuos de hormigón recogidos localmente. Se prepararon muestras con diferentes porcentajes de reemplazo de RCD (0, 20, 40 y 60%) de agregados de concreto reciclado grueso y fino. Se llevaron a cabo pruebas para determinar los resultados del concreto en estado fresco, incluyendo la temperatura, el contenido de aire, la consistencia y la densidad. En cuanto al concreto en estado endurecido, se evaluaron la resistencia a la compresión, la resistencia a la rotura por tracción y la densidad, obteniendo los siguientes resultados:

- Las pruebas indicaron que al sustituir los agregados naturales por reciclados se produjo una ligera mejora en el rendimiento general del hormigón. Sin embargo, se mostró también que al aumentar el porcentaje de reemplazo se ve reducida la trabajabilidad, un poco de disminución de la resistencia a la tracción y solo una ligera mejora en la resistencia a la compresión.
- Para una trabajabilidad constante, la cantidad de agua se vio aumentada entre un 6 a un 14% más que la requerida para la mezcla sin RCD.
- Este estudio demostró que el uso de RCD en mezclas de concreto es una opción viable para una construcción sustentable, siempre y cuando se sigan los lineamientos y buenas prácticas de diseño y construcción.

A partir de la revisión y análisis de las referencias anteriores se concluye que el uso de AGR en sustitución de AGN en la elaboración de concreto presenta resultados óptimos en cuanto al desempeño mecánico, adicionalmente, se observa que al aumentar la cantidad de AGR la resistencia presenta una leve disminución y el concreto contiene mayor porosidad y absorción que un concreto convencional, aun así, los resultados continúan siendo óptimos y puede ser utilizado en elementos estructurales.

Contribuyendo a los aportes de los análisis anteriormente mencionados y con el propósito de lograr un correcto desarrollo de este trabajo de grado donde se determine la influencia de la sustitución parcial y total de AGR por AGN en un concreto nuevo, se evaluó el comportamiento mecánico y físico para un concreto de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta (35 MPa) resistencia con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR proveniente de concreto reciclado con resistencia conocida. [18]

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se llevó a cabo la metodología presentada en la *Figura 8*.

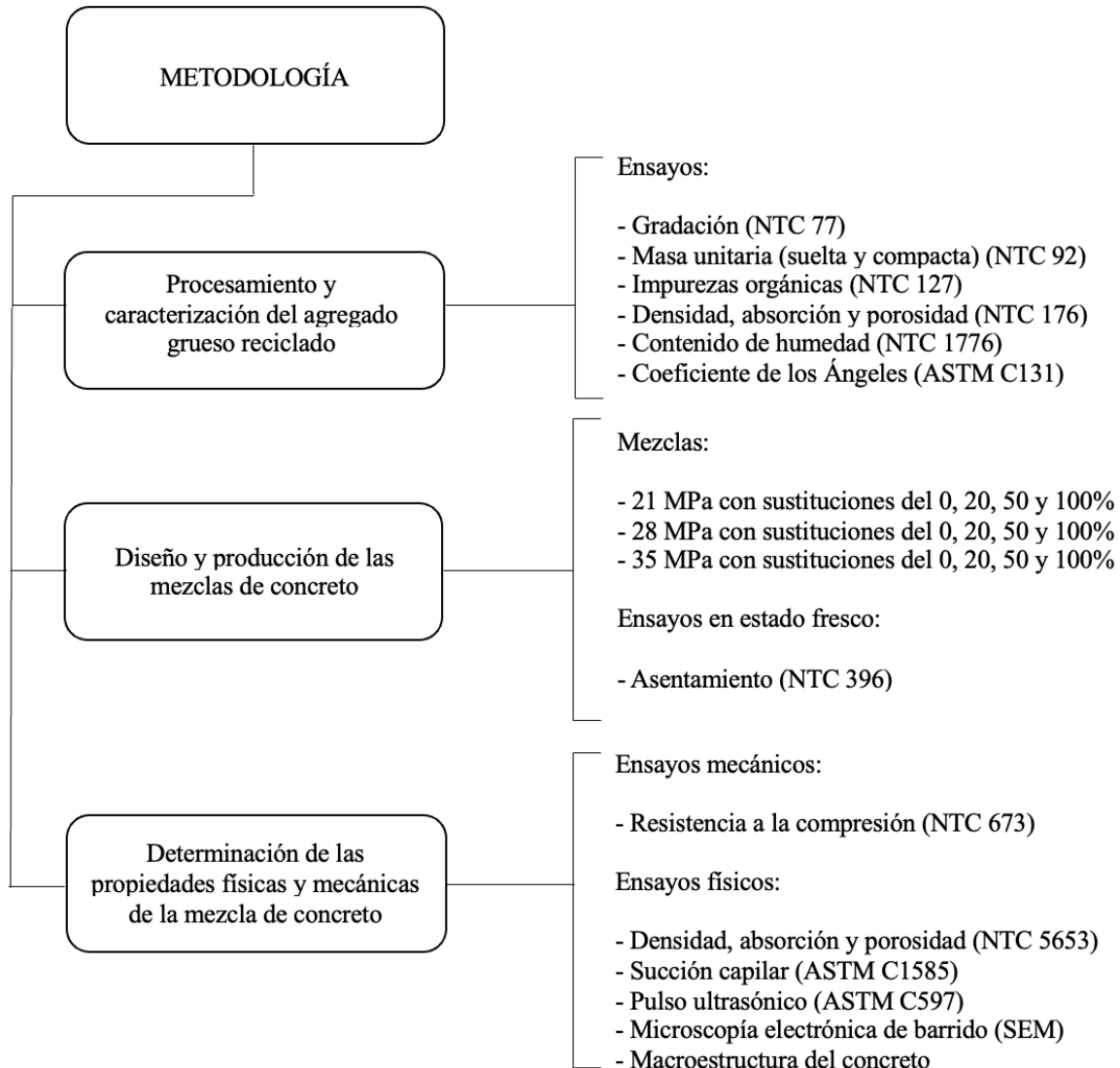


Figura 8. Metodología.
Fuente. Propia

A continuación, se describe de forma detallada la metodología propuesta, la cual se centra en cuatro fases; procesamiento y caracterización del agregado grueso reciclado, diseño y producción de las mezclas de concreto, determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto y, por último, un análisis de los resultados.

6.1. Procesamiento y caracterización de los agregados

El AGR utilizado como sustitución del AGN en este trabajo de grado fue obtenido de la trituración de 130 cilindros testigos de concreto (*ver Figura 10 y 11*) que fueron ensayados previamente a compresión en un laboratorio de control de mezclas de una importante constructora local; teniendo el registro de las resistencias a los 28 días de curado bajo agua (*ver Figura 9*), se determinó su resistencia promedio y se realizó un tratamiento estadístico de los datos para representar de manera gráfica la dispersión y tendencia de los datos.



Figura 9. Curado de cilindros en el laboratorio de control de mezclas de la constructora.
Fuente. Propia



Figura 10. Punto limpio (escombrera) de la constructora, donde se disponen normalmente los RCD limpios, incluidos los cilindros testigos ensayados.
Fuente. Propia



Figura 11. Cilindros testigos después del ensayo de resistencia a la compresión utilizados como material de partida para la producción del AGR.
Fuente. Propia

Estas muestras de concreto reciclado fueron procesadas en una trituradora de mandíbula en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle (*ver Figura 12*), ajustando la abertura de la quijada para obtener un tamaño de partícula cercano a 1". Posterior a la trituración, el material triturado se pasó por una zaranda de abertura 1" con el objetivo de garantizar este tamaño máximo del agregado. Finalmente, toda la muestra de material triturado se homogenizo manualmente (por paleo), con el fin de conseguir una granulometría homogénea y representativa en toda la muestra (*ver Figura 13*).



Figura 12. Trituradora de mandíbula
Fuente. Propia



Figura 13. Tamizado del RCD
Fuente. Propia.

Posteriormente, se realizó la caracterización físico-mecánica del agregado grueso reciclado y los agregados naturales siguiendo las especificaciones establecidas en las Normas Técnicas Colombianas con el objetivo de conocer las propiedades de los materiales y así llevar a cabo el diseño del concreto.

Los ensayos de caracterización de los agregados realizados fueron los siguientes:

6.1.1. Gradación

Se determina la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados por medio de un proceso de tamizado estipulado en la NTC 77 [19], el cual se ilustra en la *Figura 14*.



Figura 14. Tamices
Fuente. Propia.

Para determinar la granulometría de los agregados se tomó una muestra de 1000g para el AFN y 2000g para el AGR y AGN, las cuales se llevaron a una temperatura de 110°C en un horno durante 24 horas. Al enfriarse la muestra, se introducen las partículas en los tamices, los cuales fueron acomodados de mayor a menor abertura. A continuación, se muestran en la *Tabla 5* los tamices usados para el AFN y en la *Tabla 6* para los AGR y AGN.

*Tabla 5. Distribución de tamices para AFN.
Fuente. Propia.*

Tamiz	Abertura (mm)
1 / 2"	12,7
3 / 8"	9,52
Nº4	4,75
Nº8	2,38
Nº16	1,19
Nº30	0,595
Nº50	0,297
Nº100	0,149
Nº200	0,074

*Tabla 6. Distribución de tamices para AGR y AGN.
Fuente. Propia.*

Tamiz	Abertura (mm)
1"	25,4
3 / 4"	19,1
1 / 2"	12,7
3 / 8"	9,52
1 / 4"	6,35
Nº4	4,75
Nº8	2,38
Nº16	1,19
Nº30	0,595
Nº50	0,297
Nº100	0,149

6.1.2. Masa unitaria (suelta y compacta)

Por medio de este ensayo se determinó la densidad volumétrica (masa unitaria) del agregado en estado compactado y suelto según lo establecido en la NTC 92 [20] .

Teniendo en cuenta el TMN de las partículas, este ensayo se llevó a cabo por el método de apisonamiento; inicialmente se determinó la masa del molde vacío, luego se llenó el molde en tres diferentes capas, donde se dan 25 golpes con una varilla distribuidos uniformemente en cada capa sin afectar la capa previa; posteriormente, se toma la masa del molde con el contenido.

La densidad volumétrica se obtiene con la siguiente formula:

$$M = (G-T) / V$$

Donde G es la masa del agregado más el molde, T es la masa del molde, y V el volumen del molde.

6.1.3. Impurezas orgánicas

Los agregados finos normalmente presentan impurezas orgánicas, las cuales pueden afectar negativamente en la hidratación del concreto e influir en el desarrollo normal de la resistencia, por lo que según la NTC 127 nos presenta procedimientos para una determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales para el agregado fino usado en mortero y concreto hidráulico [21].

El procedimiento que se lleva a cabo es llenar una botella de vidrio con 130 ml del agregado fino al que se le realizará la muestra, se añade la solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen de agregado fino y el líquido indicado después de la agitación sea de 200 ml aproximadamente, se deja reposar 24 horas y después de esto, se analiza el tono que toma el líquido sobre la muestra a partir de la *Tabla 7* y así interpretar el resultado basándose en dicho color.

*Tabla 7. Escala de color Gardner.
Fuente. NTC 127.*

Color Gardner estándar No.	Placa orgánica No.
5	1
8	2
11	3 (estándar)
14	4
16	5

6.1.4. Densidad, absorción y porosidad.

Por medio de este ensayo se determinó la densidad relativa y la absorción del agregado grueso siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 176 [22]. La densidad relativa es una medida adimensional que se expresa como seca al horno, saturada y superficialmente seca.

Consiste en tomar una muestra del material grueso que no pase por el tamiz de 4,75 mm, este es lavado para remover polvos u otros recubrimientos de la superficie; la masa mínima que se usa para este ensayo se determina a partir de la *Tabla 8*.

Tabla 8. Requisitos de estimación de masa mínima pasa D, A y P.
Fuente. NTC 176.

Tamaño máximo nominal, (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (Kg)
12,5 o menor	2
19,0	3
25,0	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
125	75

Se procede a secar la muestra en el horno hasta alcanzar una masa constante a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Luego, se deja enfriar a temperatura ambiente durante un periodo de 1 a 3 horas. Pasado este tiempo, la muestra se sumerge en agua y se mantiene sumergida durante 24 horas.

Posteriormente, se retira la muestra del agua y se envuelve en un paño absorbente hasta que se eliminen todas las partículas visibles de agua. Se determina entonces la masa de la muestra. Inmediatamente después, la muestra saturada se coloca en un recipiente y se determina su masa aparente en el agua.

Una vez completado este procedimiento, la muestra de ensayo se seca nuevamente en el horno hasta alcanzar una masa constante, lo que permite determinar su masa final.

La densidad relativa (SH) se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{(B-C)}$$

Donde:

A= Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno.

B= Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca.

C= Masa aparente en el agua de la muestra de ensayo saturada.

La densidad relativa (SSS) del agregado grueso superficialmente seco se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{(B-C)}$$

y la densidad relativa aparente:

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A-C)}$$

Para la absorción se calcula el porcentaje de la siguiente forma:

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

Estos datos sobre la densidad, absorción y porosidad de los agregados gruesos son fundamentales para el diseño de mezclas de concreto. Estos parámetros influyen directamente en la cantidad de agua y cemento que se debe agregar a la mezcla para lograr las propiedades deseadas, como resistencia, durabilidad y trabajabilidad.

Asimismo, la densidad y porosidad de los agregados gruesos afectan la densidad y resistencia del concreto final. Por lo tanto, comprender estos datos permite ajustar la proporción de agregados en la mezcla para lograr las características mecánicas deseadas del concreto.

6.1.5. Contenido de humedad

Según la NTC 1776 se determinó el porcentaje de humedad evaporable en la muestra de agregados. En la elaboración de este ensayo, primeramente, se determinó la masa de la muestra, después, la muestra fue sometida a una temperatura de 110°C en un horno y nuevamente fue pesada [23].

Para determinar el porcentaje de humedad evaporable, se llevó a cabo la siguiente ecuación:

$$P = 100 * (W - D) / D$$

Donde:

P = contenido de humedad total evaporable de la muestra.

W = masa de la muestra original.

D = masa de la muestra seca.

6.1.6. Coeficiente de los Ángeles

El ensayo tiene como objetivo simular el comportamiento del agregado bajo la influencia de factores como la abrasión y el desgaste, con el fin de determinar su idoneidad para el uso al que está destinado. Esta prueba se lleva a cabo en un tambor de acero giratorio. Según la norma ASTM C131, implica tomar una muestra seleccionada de la *Tabla 9* y utilizarla como base para determinar la cantidad de esferas que se cargarán para llevar a cabo el procedimiento. A medida que el tambor gira, una placa recoge la muestra y las esferas de acero, las transporta hasta que caen en el lado opuesto del tambor, lo que crea un efecto de impacto y aplastamiento.[24]

A partir de la granulometría de la muestra, se selecciona el tipo de agregado y la cantidad de esferas a usar en el ensayo. Estas se introducen en el tambor junto con las esferas, y se ajustan los tornillos correctamente. La máquina se ajusta entre 30 y 33 revoluciones por minuto (rpm). Una vez completado el tiempo requerido, se descarga la máquina y se separa el material grueso, este material se lava y se coloca en un horno a una temperatura de 110 ± 5 °C.

La fracción que retiene el tamiz N°12 se une al material más grueso y se pesa para obtener un peso final.

Tabla 9. Estimación de masa para Coeficiente de los Ángeles.
Fuente. ASTM C131.

Aperturas del tamiz		Masa de las aperturas			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
3"	2 1/2"				
2 1/2"	2"				
2"	1 1/2"				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Total peso (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Nº de esferas		12	11	8	6
Revoluciones		500			

los resultados se obtienen de la siguiente manera:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{pi - pf}{pi}$$

Donde:

Pi= Peso inicial.

Pf= Peso final.

Mediante este ensayo, podemos conocer la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto y los agregados con el paso del tiempo. Esto es fundamental para asegurar la calidad y la longevidad de las estructuras construidas con estos materiales.

6.2. Diseño y producción de las mezclas de concreto

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados se llevó a cabo el diseño y producción de la mezcla donde se propuso obtener concretos basados en cemento Portland (OPC) de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta resistencia (35 MPa) con sustituciones (en peso) del 0, 20, 50 y 100% de agregado natural (grava) por AGR. El agregado fino utilizado para todas las mezclas fue arena natural de río.

6.2.1. Mezclas

Teniendo como referencia el logro de resistencias a la compresión (28 días) mínimas de 21, 28 y 35 MPa, se realizaron diseños de mezclas de baja, media y alta resistencia (contenidos de 350, 400 y 500 kg de cemento Portland/m³) con sustituciones (en peso) del 0, 20, 50 y 100% de AGR; para cada porcentaje de sustitución se mezclaron 17 litros, de los cuales se obtuvieron 15 probetas, lo que quiere decir, 60 probetas para cada resistencia. La metodología de diseño se llevó a cabo siguiendo lo indicado por el ACI 211.1; basados en esta normativa, se determinaron las fracciones de agregados por medio del método de volumen absoluto adaptado

con el principio de gradación ideal propuesto por Fuller-Thompson. Para garantizar la trabajabilidad del concreto se utilizó el aditivo superplastificante SikaPlast MO 5600 y se trabajó con tres asentamientos de diseño, en función del contenido de cemento (350, 400 y 500 kg/m³).

6.2.2. Ensayos en estado fresco

6.2.2.1. Asentamiento

Este ensayo se lleva a cabo siguiendo los lineamientos de la norma NTC 396, la cual indica que se mide mediante el cono de Abrams [23]. Se sostiene firmemente una placa de metal donde se apoya el cono para evitar que se mueva. El llenado se realiza en tres capas, y por cada una de ellas se efectúan 25 golpes con una varilla redondeada en sus extremos. Es importante destacar que los golpes de una capa no deben sobrepasar a la siguiente. Una vez que el cono está completamente lleno, se enrasa y se retira de manera uniforme. Luego, se voltea el cono y se coloca invertido al lado de la muestra. Utilizando un flexómetro, se mide la diferencia entre ellos para obtener la medida del asentamiento, el cual es crucial para evaluar la consistencia del concreto.

6.3. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de concreto

Teniendo los especímenes de concreto de las diferentes mezclas en probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura, se procede a realizar los siguientes ensayos donde se evalúan las propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido.

6.3.1. Ensayos mecánicos

6.3.1.1. Resistencia a la compresión

En este ensayo, haciendo uso de una prensa hidráulica Dirimpex CT-1500 (*ver Figura 15*) la cual registra la fuerza y el esfuerzo aplicado en unidades de kN y MPa respectivamente, con una velocidad de carga de 0,25 MPa/s, se determinó la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto a los 7, 14, 28 y 90 días de curado de los especímenes según lo establecido en la NTC 673, la cual especifica que este método de ensayo consiste en someter el espécimen de prueba a una carga axial de compresión hasta que ocurra la falla, antes de llevar a cabo el ensayo las probetas son extraídas de la zona de curado y se dejan secando a la intemperie por lo menos una hora [25].



*Figura 15. Prensa hidráulica.
Fuente. Propia.*

6.3.2. Ensayos físicos

6.3.2.1. Densidad, absorción y porosidad

Se determinó la densidad, absorción y porosidad de las mezclas de concreto en estado endurecido a la edad de 28 días de acuerdo con la NTC 5653 [26]. Inicialmente las muestras se secan por 24h en un horno a una temperatura entre 100°C y 110°C, posteriormente se dejan al aire libre teniendo en cuenta que la temperatura debe ser entre 20°C y 25°C hasta obtener una temperatura normal en la probeta y finalmente se determina su masa (A). Luego, se sumergen los especímenes en agua a 21°C aproximadamente por 48 h para alcanzar una condición de saturación, al extraerse se seca la humedad superficial con una toalla y nuevamente se determina su masa (B). Posteriormente se ingresan las probetas en un recipiente y se cubre totalmente con agua y somete al calor hasta que hierve durante 5 h, se deja enfriar por pérdida normal de calor durante 14h o más hasta alcanzar una temperatura entre 20°C y 25 °C, se retira la humedad superficial nuevamente con una toalla y se determina su masa (C). Finalmente se suspende el espécimen con una cuerda o alambre y se determina su masa en el agua (D).

Con las masas determinadas anteriormente se procede a realizar los siguientes cálculos:

Absorción después de inmersión (%) : $[(B - A) / A] * 100$

Absorción después de inmersión y hervido (%) : $[(C - A) / A] * 100$

Densidad seca, g_1 (g/cm^3) : $[A / (C - D)]$

Densidad después de inmersión, ρ (g/cm^3) : $[B / (C - D)]$

Densidad después de inmersión y hervido, ρ (g/cm^3) : $[C / (C - D)]$

Densidad aparente, g_2 (g/cm^3) : $[A / (A - D)]$

Volumen de poros permeables (vacíos) (%) : $(g_1 * g_2) / g_2 * 100$, o también
 $(C - A) / (C - D) * 100$

6.3.2.2. Succión capilar

La ASTM C1585 establece que este ensayo es utilizado para determinar la absorción por capilaridad. Para llevar a cabo la prueba, es necesario cortar los especímenes de concreto endurecido a una altura de 50 mm, posteriormente, las muestras son sometidas a una temperatura de 50°C durante 48 h, luego se deja enfriar a temperatura ambiente y se les hace un sellado contra el agua aplicando tres capas de Acronal en sus laterales y se seca nuevamente en el horno a 50°C por 48 h. Al sacar las muestras del horno y conseguir una temperatura ambiente, se pesan las muestras y se procede a ponerlas en un recipiente el cual contiene una espuma saturada de agua como se evidencia en la *Figura 16*, hecho esto, se toma la masa de las probetas en los tiempos establecidos, siendo secadas superficialmente antes de pesarlas [27].



*Figura 16. Probetas de Succión Capilar.
Fuente. Propia.*

Para determinar la absorción se realizan los siguientes cálculos:

$$I = Mt / a * d$$

Donde:

I: absorción.

Mt: cambio en la muestra de la masa en gramos a través del tiempo *t*.

a: área expuesta de la muestra en mm²

d: densidad del agua en g/mm³

Posterior a la toma de datos se procede a realizar una gráfica en donde se evidencian dos zonas. La primera considerada como zona de absorción inicial, la cual se constituye de las primeras horas del ensayo y la zona de absorción secundaria que se refiere a todos los datos posteriores a 24 horas en contacto con el agua. ver *Figura 17*. Finalmente, se determina la tasa de absorción hallando la pendiente para ambas zonas, la cual representa numéricamente la tendencia de absorción del ensayo.

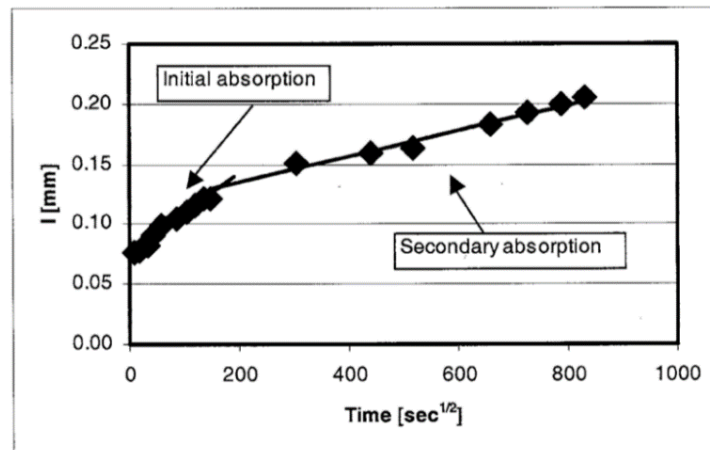


Figura 17. Ejemplo de gráfica de absorción.
Fuente. ASTM C1585.

6.3.2.3. Pulso ultrasónico

Con el equipo de pulso ultrasónico Pundit Proceq (ver Figura 18) se realizó el ensayo definido en la norma ASTM C597, el cual se utiliza para evaluar la uniformidad y calidad del concreto, y/o para detectar la presencia de huecos y grietas [28]. Ensayo que consiste en determinar la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos a través del concreto, usando en este caso una ganancia de velocidad de 10x y un voltaje de 200 V como variables de ensayo. Se toma la distancia entre cara y cara de los cilindros de ensayo, se aplica un agente de acoplamiento apropiado como vaselina, grasa u otro material viscoso en cada cara, para posteriormente ubicar los transductores, uno en una cara del cilindro y el segundo en la otra como se puede observar en la Figura 19, de forma que quede uno frente a otro presionando firmemente hasta que se muestre un tiempo de tránsito estable, el cual se toma como dato para despejar así la velocidad de la siguiente manera.

$$V=L/T$$

Donde:

V = velocidad del pulso ultrasónico

L = distancia entre los centros de las caras de los transductores

T = tiempo de transmisión

Posteriormente, con los valores de velocidad obtenidos se determina la calidad del concreto teniendo en cuenta que concretos con propiedades optimas de densidad y uniformidad generalmente presentan mayor velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. Adicionalmente, se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico con los valores de velocidad obtenidos, la densidad del concreto y el coeficiente de Poisson correspondiente al concreto haciendo uso de la ecuación especificada en la ASTM C597 [28].

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde:

V = Velocidad del pulso ultrasónico

μ = Coeficiente Poisson, 0.25

ρ = Densidad del concreto, 2400 kg/m³



Figura 18. Equipo Pundit Proceq utilizado para el ensayo de pulso ultrasónico
Fuente. Propia.

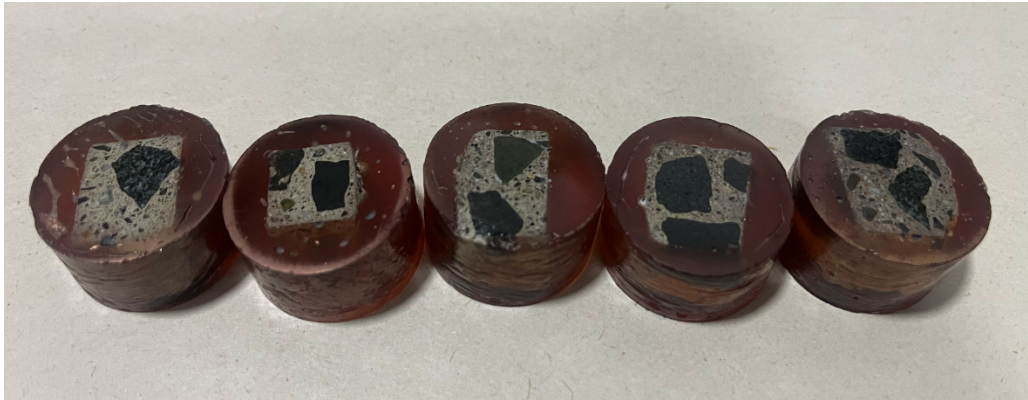


Figura 19. Ensayo de Pulso ultrasónico.
Fuente. Propia.

6.3.2.4. Macroestructura del concreto

Se realizaron tomas de la macroestructura de los concretos con ayuda de un dispositivo móvil de marca 'realme gt2 pro', el cual cuenta con un microlente de 40 aumentos ópticos lo que permite identificar la zona de transición entre el RCD y la nueva pasta cementante. Para analizar la macroestructura se usaron las muestras preparadas para la prueba de microscopia electrónica de barrido SEM, las cuales se ilustran en la *Figura 20*; para este ensayo es necesario llevar a cabo una preparación de las probetas donde se extrajo de los cilindros testigos, una muestra de 1 cm x 1 cm aproximadamente la cual se coloca en un molde circular de 2.54 cm de diámetro, que se rellena aproximadamente con una resina poliéster hasta una altura de 2 cm aproximadamente, quedando encapsulada la muestra de concreto.

Una vez se seca por completo y se endurece la resina, se retiran del molde y se proceder a pulir la superficie con lijas de diferentes tamaños de granos para disminuir la rugosidad en la superficie de las muestras y finalmente se pasan por dos tipos de paños para lograr el acabado idóneo de la superficie y llevar a cabo el ensayo de observación macro y microscópica.



*Figura 20. Probetas prueba SEM.
Fuente. Propia*

6.3.2.5. Microscopía SEM

Esta prueba se lleva a cabo con un microscopio electrónico de barrido (SEM), los cuales contienen un filamento que genera un haz de electrones que interaccionan con la muestra de estudio y devuelven señales que pueden ser interpretadas por distintos detectores; de estas imágenes se pueden obtener datos respecto a su morfología, composición, textura, etc.

Para la ejecución de este proyecto, las muestras descritas en el ítem 6.3.2.4 del presente documento, se adhirieron sobre una cinta de carbono y con el fin de generar una superficie que fuera conductora, se realizó un metalizado superficial con oro, utilizando el equipo Denton Vacuum Modelo Desk IV a una presión de 50 mTorr y un tiempo de 60s. Posteriormente se realizó la inspección en un microscopio JEOL Modelo JSM 6490 LV en el modo de electrones retrodispersados mediante un voltaje de aceleración de 20kV (ver Figura 21).



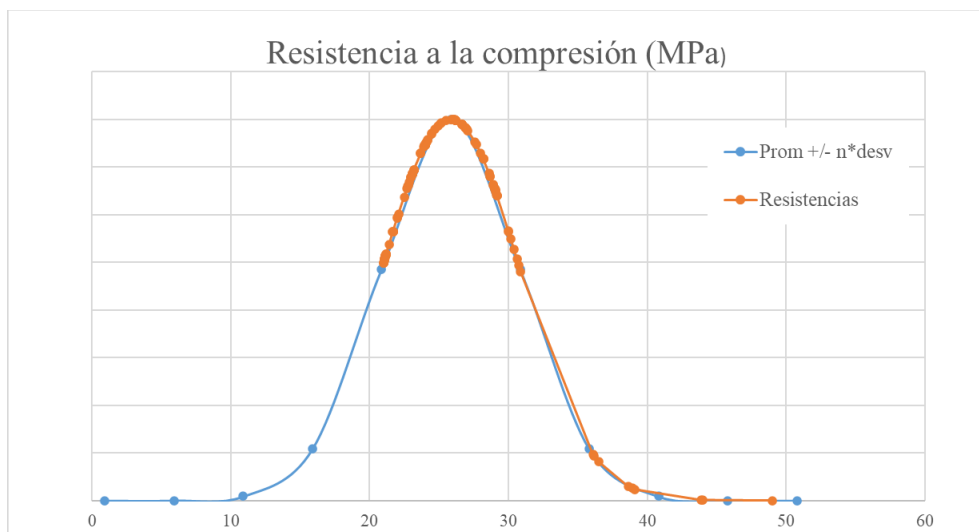
*Figura 21. MEB utilizado en la prueba SEM
Fuente. Propia*

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se analizaron los resultados obtenidos con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de un agregado grueso reciclado (AGR) de resistencia conocida, sobre el desempeño físico- mecánico de concretos de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta resistencia (35 MPa), dando respuesta al objetivo central de este trabajo de grado.

7.1. Procesamiento y caracterización de los agregados

Los RCD utilizados en este proyecto de grado fueron suministrados por una importante constructora local. Un total de 130 cilindros de ensayo se fallaron a compresión en el laboratorio de control de mezclas de la constructora y, posteriormente, en la Escuela de ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, se trituraron los cilindros de concreto fallados con una trituradora de mandíbula con el fin de obtener un agregado grueso reciclado (AGR), tal y como fue descrito anteriormente en la metodología. A partir de las resistencias obtenidas de los 130 cilindros ensayados (concreto de partida) se determinó una resistencia promedio de 25,85 MPa a los 28 días de curado con una desviación estándar de 4.98. Se realizó un análisis estadístico de los resultados, y una representación gráfica de la tendencia y dispersión de los datos obtenidos; de la *Figura 22* se puede observar que la mayoría de los datos obtenidos de las resistencia del concreto reciclado están cerca de la media, es decir que son valores típicos y no presentan mayor dispersión, lo que lleva a concluir que se tiene una distribución normal adecuada; cabe mencionar que se presentan dos datos que se encuentran por fuera del 99,73%, es decir, su valor supera tres veces la desviación estándar de todos los datos, y como consecuencia se pueden considerar como datos atípicos. Los resultados obtenidos permiten concluir que la resistencia especificada del concreto de partida era de 21 MPa (3000 p.s.i.), valor que se puede tomar de referencia para posteriores análisis.



*Figura 22. Resistencia a la compresión de cilindros fuente AGR.
Fuente. Propia*

Para llevar a cabo la ejecución del diseño del concreto, se hizo uso de los agregados gruesos reciclados mencionados anteriormente y de agregados finos y gruesos obtenidos de fuentes naturales; inicialmente se realizó la caracterización de los agregados realizando los ensayos

presentados a continuación, los cuales se desarrollan según lo establecido en la Norma Técnica Colombiana con el fin de conocer sus propiedades; donde se obtuvo que los agregados tienen propiedades óptimas para ser utilizados en la elaboración de las mezclas de concreto como se evidencia a continuación.

7.1.1. Gradación

A continuación, se determinó la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados por medio de un proceso de tamizado estipulado en la NTC 77 [19].

- Agregado grueso natural (AGN):

En la *Tabla 10* se encuentra el número del tamiz y el orden en los que fueron acomodados para la obtención de la granulometría del agregado grueso natural, donde se encuentra que el tamaño máximo nominal (TMN) y tamaño máximo (TM) del AGN fue de $\frac{3}{4}$ " para ambos casos.

*Tabla 10. Gradación AGN.
Fuente. Propia*

AGN					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1"	25,4	0	0%	0%	100%
3/4"	19,1	0	0%	0%	100%
1/2"	12,7	739,98	37%	37%	63%
3/8"	9,52	756,54	38%	75%	25%
1/4"	6,35	477,33	24%	99%	1%
Nº4	4,75	4,65	0%	99%	1%
Nº8	2,38	0,51	0%	99%	1%
Nº16	1,19	0,22	0%	99%	1%
Nº30	0,595	0,21	0%	99%	1%
Nº50	0,297	0,24	0%	99%	1%
Nº100	0,149	0,3	0%	99%	1%
Base	-	15,03	1%	100%	0%

- Agregado grueso reciclado (AGR):

En la *Tabla 11* se observa el orden y los tamaños de tamices utilizados en la prueba para obtener la granulometría del agregado grueso reciclado, donde se encuentra que el tamaño máximo nominal (TMN) y tamaño máximo (TM) del AGR fue de $\frac{3}{4}$ " y 1" respectivamente.

*Tabla 11. Gradación AGR.
Fuente. Propia.*

AGR					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1"	25,4	0	0%	0%	100%
3/4"	19,1	144,52	7%	7%	93%
1/2"	12,7	297,24	15%	22%	78%
3/8"	9,52	416,42	21%	43%	57%
1/4"	6,35	547,33	27%	70%	30%
Nº4	4,75	194,77	10%	80%	20%
Nº8	2,38	324,22	16%	96%	4%
Nº16	1,19	30,12	2%	98%	2%
Nº30	0,595	10,17	1%	98%	2%
Nº50	0,297	6,95	0,35%	99%	1%
Nº100	0,149	0,1	0,01%	99%	1%
Base	-	26,81	1%	100%	0%

Al comparar la distribución granulométrica del AGR respecto del AGN, se observa que el agregado de origen natural presenta una notoria diferencia en la cantidad de material retenido

en los tamices de mayor abertura, lo que significa que sus partículas son de mayor tamaño; esto se puede relacionar con el proceso por el que pasan los RCD para obtener el AGR, puesto que al someter los cilindros de concreto reciclado a un proceso de trituración este es más propenso a alcanzar menores tamaños obteniendo una distribución más homogénea [29].

- Agregado fino natural (AFN):

En la *Tabla 12* se observa la granulometría obtenida para la arena, siguiendo lo estipulado en la NTC 77 [19] se define que el módulo de finura (MF) del AFN es de 2,69, valor que cumple con los límites establecidos en la NTC 174 [30]; se puede decir que se trata de una arena fina ya que presenta mayor porcentaje retenido en los tamices de menor apertura, este tipo de arena por su textura permite una mejor adherencia entre los materiales sin generar un aumento considerable en el consumo de agua.

*Tabla 12. Gradación AFN.
Fuente. Propia.*

AFN					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	13,17	1%	1%	99%
3/8"	9,52	7,05	1%	2%	98%
Nº4	4,75	32,18	3%	5%	95%
Nº8	2,38	42,65	4%	10%	90%
Nº16	1,19	121,87	12%	22%	78%
Nº30	0,595	255,09	26%	47%	53%
Nº50	0,297	374,41	37%	85%	15%
Nº100	0,149	123,23	12%	97%	3%
Nº200	0,074	18,87	2%	99%	1%
Base	-	10,51	1%	100%	0%

7.1.2. Masa unitaria (suelta y compacta)

Según lo establecido en la NTC 92 [20] se determinó la masa unitaria del agregado en estado suelto y compacto, obteniendo los siguientes resultados:

- Agregado grueso reciclado (AGR)

*Tabla 13. Masa unitaria suelta AGR.
Fuente. Propia.*

Masa unitaria AGR				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad suelta (kg/m ³)	% de vacíos
0,00270	2,44	6,15	1372,41	41,48
0,00270	2,44	6,16	1376,11	41,32
0,00270	2,44	6,12	1362,43	41,91

Tabla 14. Masa unitaria compacta AGR.
Fuente. Propia.

Masa unitaria AGR				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad compacta (kg/cm ³)	% de vacíos
0,00270	2,44	6,20	1392,38	40,63
0,00270	2,44	6,21	1394,97	40,52
0,00270	2,44	6,20	1390,53	40,71

- Agregado grueso natural (AGN)

Tabla 15. Masa unitaria suelta AGN.
Fuente. Propia.

Masa unitaria AGN				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad suelta (kg/m ³)	% de vacíos
0,00270	2,44	6,24	1405,33	49,16
0,00270	2,44	6,28	1420,12	48,63
0,00270	2,44	6,26	1414,94	48,82

Tabla 16. Masa unitaria compacta AGN.
Fuente. Propia.

Masa unitaria AGN				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad compacta (kg/cm ³)	% de vacíos
0,00270	2,44	6,30	1427,88	48,35
0,00270	2,44	6,32	1433,80	48,13
0,00270	2,44	6,31	1431,58	48,21

- Agregado fino natural (AFN)

Tabla 17. Masa unitaria suelta AFN.
Fuente. Propia.

Masa unitaria AFN				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad suelta (kg/m ³)	% de vacíos
0,00076	0,63	1,80	1528,71	39,69
0,00076	0,63	1,81	1545,10	39,05
0,00076	0,63	1,79	1522,49	39,94

Tabla 18. Masa unitaria compacta AFN.
Fuente. Propia.

Masa unitaria AFN				
Volumen molde (m ³)	Molde (kg)	Molde + Masa (kg)	Densidad compacta (kg/cm ³)	% de vacíos
0,00076	0,63	1,90	1658,57	34,57
0,00076	0,63	1,90	1669,27	34,15
0,00076	0,63	1,90	1663,29	34,38

En los datos registrados en la *Tabla 13* hasta la *Tabla 18* se encuentran los resultados obtenidos para la densidad y el porcentaje de vacíos. Al comparar los valores de masa unitaria suelta y compacta, se puede observar que los valores de masa unitaria compacta son mayores, así mismo la densidad aumenta y el porcentaje de vacíos entre partículas disminuye; esto se debe a que al compactar la muestra ingresa más material en un determinado volumen de molde. En los

resultados también se puede observar que los valores de masa unitaria suelta y compacta son levemente mayores en el AGN, debido a que el mortero adherido a los AGR presenta mayor cantidad de poros lo que genera que este presente un valor de masa menor en comparación con AGN aunque tenga mejor distribución granulométrica; adicionalmente, se puede observar que el AGN contiene mayor cantidad de vacíos debido a que cuenta con una distribución monogranular de sus partículas, las cuales se concentran en los tamices de gran tamaño.

7.1.3. Impurezas orgánicas

Siguiendo los lineamientos de la NTC 127 [31] se determinó la presencia de impurezas orgánicas en el agregado fino natural.



*Figura 23. Ensayo de Impurezas orgánicas.
Fuente. Propia.*

A partir de los resultados obtenidos sobre la cantidad de impurezas presentes en el AFN utilizado a lo largo del desarrollo del proyecto, se puede concluir que, según la escala de color de Gardner, se clasifica en el No. 2, como se puede observar en la *Figura 23*. Esto indica que el agregado es apto para su uso en las mezclas de concreto, ya que no contiene una cantidad considerable de impurezas que puedan afectar la reacción normal del cemento.

7.1.4. Densidad, absorción y porosidad

Según el ensayo establecido en la NTC 176 [32] se determinó la densidad relativa y la absorción de los agregados, los resultados se ilustran en la *Tabla 19, 20 y 21* presentadas a continuación.

Tabla 19. D, A y P del AGR.
Fuente. Propia.

AGR	
Masa seca A (g)	1946
Masa SSS B (g)	2083
Masa en el agua C (g)	1254
Densidad relativa SH	2,35
Densidad relativa SSS	2,51
Densidad relativa aparente	2,81
% Absorción	7,04

Tabla 20. D, A y P del AGN.
Fuente. Propia.

AGN	
Masa seca A (g)	1958
Masa SSS B (g)	1999
Masa en el agua C (g)	1291
Densidad relativa SH	2,77
Densidad relativa SSS	2,82
Densidad relativa aparente	2,94
% Absorción	2,09

Tabla 21. D, A y P del AFN.
Fuente. Propia.

AFN	
Masa SSS (g)	500
Arena + Agua + probeta (g)	967,93
Agua + probeta (g)	659,10
Seco (g)	486,29
Densidad relativa SH	2,54
Densidad relativa SSS	2,62
Densidad relativa aparente	2,74
% Absorción	2,82

De los datos obtenidos se puede concluir que el agregado reciclado presenta menor densidad y mayor capacidad de absorción, resultados similares que se obtuvieron en una investigación realizada por Daniela Ramírez [15] de la Universidad de Costa Rica, donde al caracterizar tres diferentes tipos de agregados reciclados, para cada uno de ellos se obtuvo una leve disminución en los valores de densidad y un incremento notorio en la capacidad de absorción respecto a los agregados naturales; esto se debe a la capacidad de absorción del cemento y mortero endurecido adherido al agregado reciclado. Por ende, en el diseño de mezcla fue necesario tener en cuenta estos criterios para no ver afectado el desempeño del concreto en estado fresco y endurecido, haciendo uso de los porcentajes de absorción y humedad para definir la dosificación por peso húmedo de las mezclas.

7.1.5. Contenido de humedad

Conforme a lo estipulado en la NTC 1776 [23] se determinó el porcentaje de humedad evaporable en los agregados; en este ensayo fueron tomadas tres muestras para el AFN y dos

muestras para AGN y AGR, a las cuales se les realizó el mismo proceso. Posteriormente se hizo un promedio de los porcentajes de humedad iniciales, los cuales se ilustran en la *Tabla 22, 23 y 24*.

*Tabla 22. Contenido de humedad AGN.
Fuente. Propia.*

AGN		
	Muestra 1	Muestra 2
Masa inicial W (g)	500,00	499,36
Masa seca D (g)	498,17	497,77
Humedad P (%)	0,37	0,32
		Promedio P (%)
		0,34

*Tabla 23. Contenido de humedad AGR.
Fuente. Propia.*

AGR		
	Muestra 1	Muestra 2
Masa inicial W (g)	516,00	485,06
Masa seca D (g)	513,47	482,51
Humedad P (%)	0,49	0,53
		Promedio P (%)
		0,51

*Tabla 24. Contenido de humedad AFN.
Fuente. Propia.*

AFN			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa inicial W (g)	839,00	849,00	848,00
Masa seca D (g)	833,50	843,10	842,08
Humedad P (%)	0,66	0,70	0,70
			Promedio P (%)
			0,69

De los datos anteriores se obtuvo como resultado que el AFN tiene mayor contenido de humedad que ambos agregados gruesos, la cual es una tendencia esperada ya que el agregado fino tiende a retener más agua por la unión de sus partículas, adicionalmente, esta propiedad se puede ver afectada por la humedad del ambiente en el que se encuentra almacenado. También se puede observar que el AGR presenta mayor contenido de humedad que el AGN, estos datos concuerdan con los resultados obtenidos en una investigación realizada en la ciudad de Lima para el uso de RCD en concreto estructural [30], donde se concluye que esto sucede debido al mortero adherido y a las microfisuras que se generan a los agregados en el proceso de triturado, lo que está directamente relacionado con que la capacidad de absorción del AGR es mayor y conlleva a que este conserve mayor cantidad de agua.

7.1.6. Coeficiente de los Ángeles

Según la norma ASTM C131 [24] se llevó a cabo este ensayo para determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso reciclado y natural. A continuación, los resultados obtenidos.

El agregado reciclado se clasifica en el tipo C por lo que se usan 8 esferas que pesaron 3295g, para el cual se obtienen los resultados reportados en la *Tabla 25*.

*Tabla 25. Coeficiente de los Ángeles, AGR.
Fuente. Propia.*

Masa original [g]	5001
Masa final [g]	3650
% Perdido [g]	27,01

Por otro lado, el agregado grueso natural se clasifica en el tipo B, por lo que se usan en el ensayo 11 esferas que pesaron 4740 g , para el cual se obtienen estos resultados (*ver Tabla 26*).

*Tabla 26. Coeficiente de los Ángeles, AGN.
Fuente. Propia.*

Masa original [g]	5003
Masa final [g]	4527
% Perdido [g]	9,51

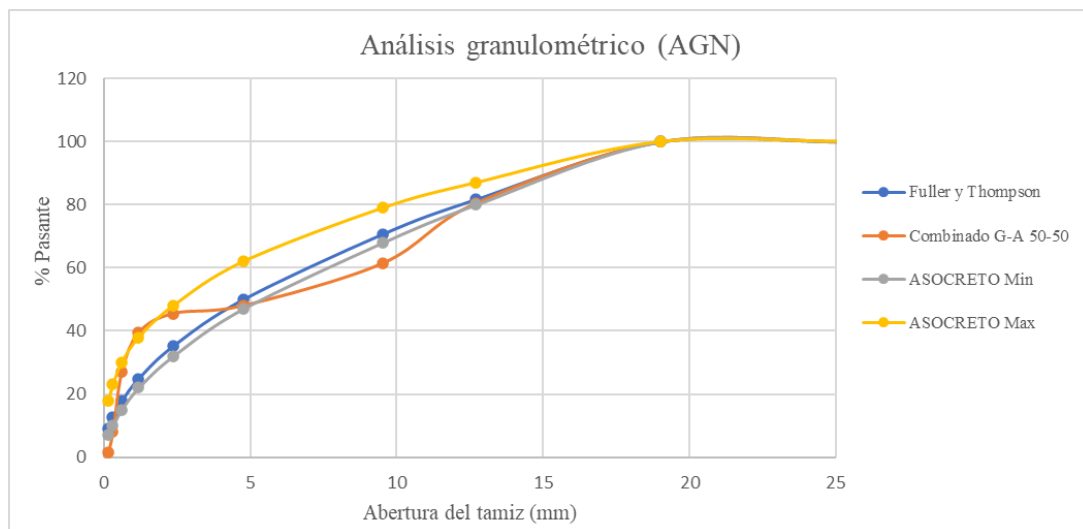
Partiendo de los resultados obtenidos se puede observar que la grava natural presenta mayor resistencia en comparación con el agregado grueso reciclado, ya que a mayor resistencia menor es el porcentaje al desgaste, lo cual se ve evidenciado en los porcentajes de pérdida obtenidos para el AGR y para el AGN que fueron 27,01 y 9,51% respectivamente; resultados que coinciden con los obtenidos por McNeil y Kang [29], donde la resistencia de los RCD es inferior a la de los agregados naturales, ya que el agregado reciclado contiene mortero adherido que puede desprenderse con facilidad debido a su zona de transición interfacial que suele ser la parte más frágil del concreto, caso que no se presenta en los agregados de origen natural. De acuerdo con el análisis para la caracterización física y mecánica de agregados reciclados llevada a cabo por el Grupo de Materiales Compuestos [33], donde los agregados con un porcentaje de desgaste superior al 50% son considerados materiales de muy mala calidad y no son aptos para mezclas de concreto estructural, mientras que aquellos con valores inferiores al 20% son materiales de muy buena calidad y resistencia al desgaste adecuados para cualquier aplicación; por lo tanto, se puede concluir que los RCD usados para este trabajo de grado son de buena calidad y aptos para concretos de uso estructural, resultados que concuerdan con lo establecido en la NTC 174 [30], donde el límite máximo para el desgaste no puede superar el 50%.

7.2. Diseño y producción de las mezclas de concreto

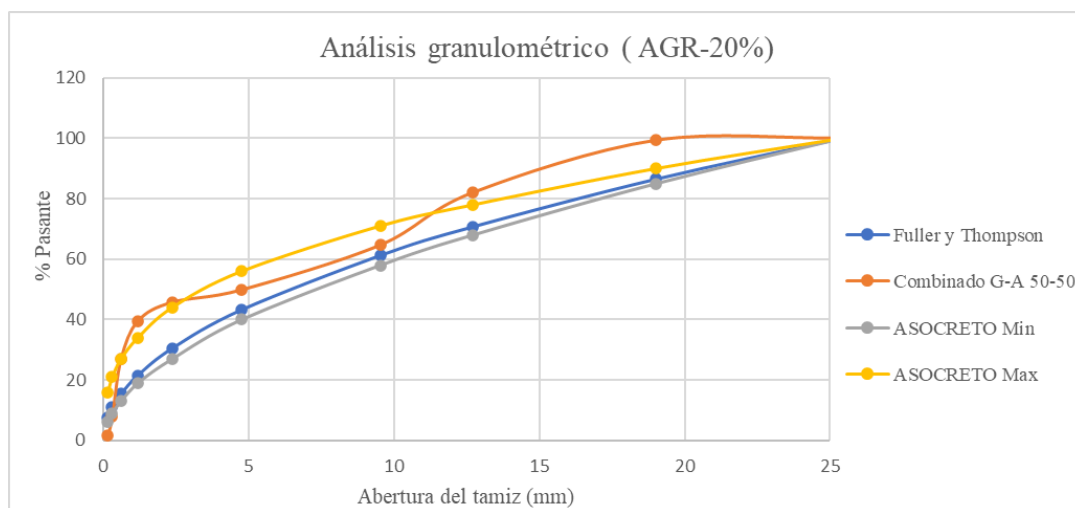
Los diseños de mezcla llevados a cabo en esta investigación se realizaron siguiendo la normativa ACI 211.1 para tres tipos de resistencia (21, 28 y 35 MPa) con sustituciones de AGR en peso del 0, 20, 50 y 100%; todas las mezclas se diseñaron con una relación agua/cemento (a/c) del 0,5, ya que según en lo establecido en el TITULO C de la NSR-10 [34], 0,5 es un valor de a/c típico para producir concretos de resistencias entre 28 y 35 MPa. Con el fin de compensar cualquier pérdida de trabajabilidad como consecuencia del uso de AGR, se empleó una dosificación del 0,5% de aditivo líquido superplastificante SikaPlast MO 5600 sobre la cantidad de cemento usada para cada mezcla; este aditivo tiene una densidad de 1,07 kg/l y está compuesto por resinas sintéticas y polímeros de última generación que brindan mayor fluidez

a la mezcla de concreto. Por otro lado, se establecieron tres asentamientos de diseño, para la mezcla de 350 kg/m³ una consistencia semiseca (35 - 50 mm), para la mezcla de 400 kg/m³ semiseca-plástica (35 - 100 mm), y para la mezcla de 500 kg/m³ una consistencia plástica-fluida (150 - 200+ mm).

Para determinar el proporcionamiento de los agregados se realizó un análisis granulométrico (ver *Figura 24*), donde se consideró una relación del 50% grava de origen natural y 50% arena, la cual es comparada con la distribución granulométrica obtenida por el método de Fuller-Thompson y los límites de Asocreto, los cuales proporcionan una guía para lograr una granulometría ideal, considerando factores como el tamaño y la forma de las partículas, así como la proporción adecuada entre el agregado grueso y el agregado fino.



*Figura 24. Análisis granulométrico (AGN).
Fuente. Propia.*



*Figura 25. Análisis granulométrico (AGR-20%).
Fuente. Propia.*

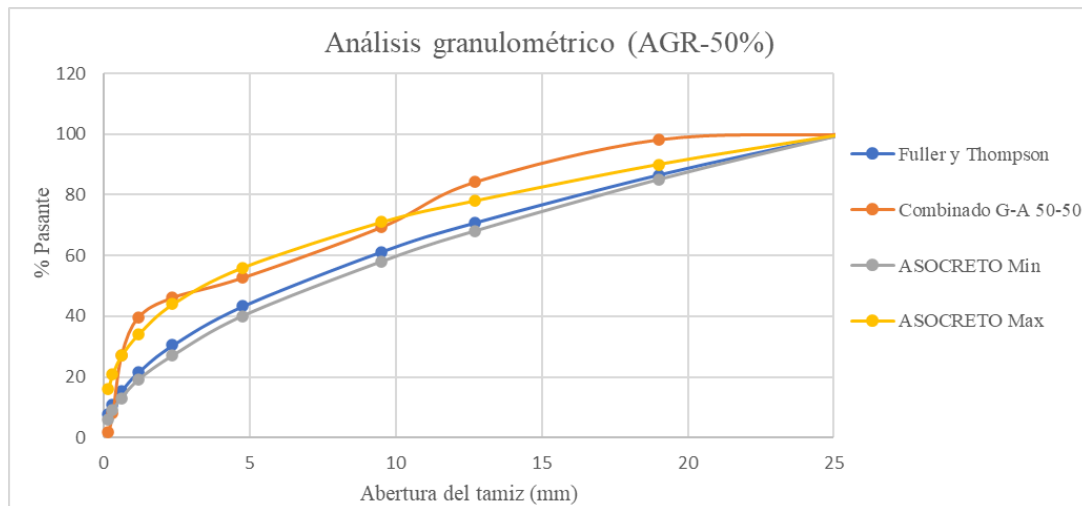


Figura 26. Análisis granulométrico (AGR-50%).
Fuente. Propia.

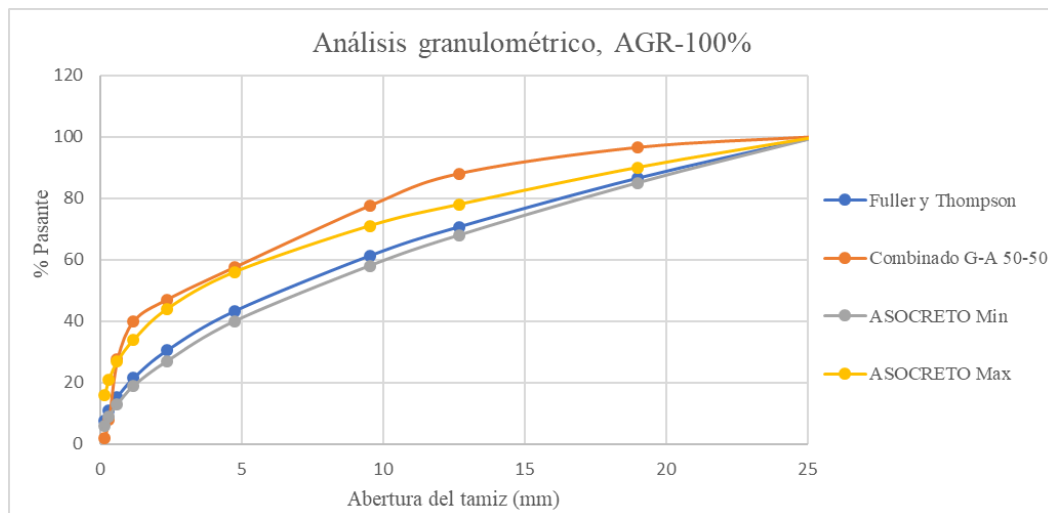


Figura 27. Análisis granulométrico (AGR-100%).
Fuente. Propia.

Al observar la *Figura 24* se puede evidenciar que entre los tamices de 4,75mm y 12,7mm se presenta una desviación entre la distribución que se genera a partir de la combinación de los agregados usados en este trabajo de grado y los límites de Asocreto, lo cual se debe a que los agregados naturales presentan una distribución monogranular, lo que quiere decir que sus partículas se concentran en los tamices de gran apertura, teniendo como resultado una curva tipo “s”, por lo tanto, para obtener una granulometría que cumpla con los límites de Asocreto, sería necesario implementar el uso de una gravilla con el fin de que el contenido entre los tamices anteriormente mencionados se ajuste y así presente una distribución más homogénea, procedimiento que no se llevó a cabo debido a que los agregados gruesos naturales con los que se realizan las mezclas en obra en la ciudad de Cali son extraídos de canteras en las cuales no se lleva a cabo una clasificación exhaustiva de los tamaños de las partículas, por lo que es poco común trabajar con una distribución granulométrica ideal en las obras. En las *Figura 25*, *Figura 26* y *Figura 27*, se puede observar que a medida que se incorpora el AGR, el comportamiento de la gráfica se asemeja a la distribución propuesta por Fuller y Thompson, donde la granulometría ideal se ve representada en una parábola, esto debido a que el AGR cuenta con una granulometría más amplia, ocasionando que la combinación de agregados tenga una distribución de tamaño de partículas más homogénea, pareciéndose más a la ideal propuesta

por Fuller y Thompson lo cual se considera como una combinación óptima incluso al sobrepasar los límites de Asocreto.

7.2.1. Mezclas

A continuación, los diseños de mezcla de baja, media y alta (350, 400 y 500 kg/m³) con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR.

- Diseño de 350 kg/m³ con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR. (ver Tabla 27, 28, 29 y 30).

Tabla 27. Diseño 350 - 0%.
Fuente. Propia.

Mezcla 350 - 0%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	350,00	3100,00	0,113	350,00
Agua	175,00	1000,00	0,175	211,60
AFN	943,66	2544,00	0,371	950,17
AGN	943,66	2766,00	0,341	946,86
AGR	0,00	2347,00	0,000	0,00
SP	1,75	-	-	1,75
Total	2414,06	-	1,000	2460,39

Tabla 28. Diseño 350 - 20%.
Fuente. Propia.

Mezcla 350 - 20%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Agua	175,00	1000,00	0,175	219,86
AFN	927,79	2544,00	0,365	934,19
AGN	742,23	2766,00	0,268	744,75
AGR	185,56	2347,00	0,079	186,50
SP	1,75	-	-	1,75
Total	2382,32	-	1,000	2437,05

Tabla 29. Diseño 350 - 50%.
Fuente. Propia.

Mezcla 350 - 50%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	350,00	3100,00	0,113	350,00
Agua	175,00	1000,00	0,175	231,73
AFN	904,96	2544,00	0,356	911,20
AGN	452,48	2766,00	0,164	454,02
AGR	452,48	2347,00	0,193	454,79
SP	1,75	-	-	1,75
Total	2336,66	-	1,000	2403,48

Tabla 30. Diseño 350 - 100%.
Fuente. Propia.

Mezcla 350 - 100%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	350,00	3100,00	0,113	350,00
Agua	175,00	1000,00	0,175	250,27
AFN	869,30	2544,00	0,342	875,30
AGN	0,00	2766,00	0,000	0,00
AGR	869,30	2347,00	0,370	873,74
SP	1,75	-	-	1,75
Total	2265,36	-	1,000	2351,06

- Diseño de 400 kg/m³ con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR. (ver Tabla 31, 32, 33 y 34).

Tabla 31. Diseño 400 - 0%.
Fuente. Propia.

Mezcla 400 - 0%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	400,00	3100,00	0,129	400,00
Agua	200,00	1000,00	0,200	234,49
AFN	889,15	2544,00	0,350	895,29
AGN	889,15	2766,00	0,321	892,18
AGR	0,00	2347,00	0,000	0,00
SP	2,00	-	-	2,00
Total	2380,31	-	1,000	2423,95

Tabla 32. Diseño 400 - 20%.
Fuente. Propia.

Mezcla 400 - 20%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	400,00	3100,00	0,129	400,00
Agua	200,00	1000,00	0,200	242,27
AFN	874,20	2544,00	0,344	880,23
AGN	699,36	2766,00	0,253	701,74
AGR	174,84	2347,00	0,074	175,73
SP	2,00	-	-	2,00
Total	2350,40	-	1,000	2401,97

Tabla 33. Diseño 400 - 50%.
Fuente. Propia.

Mezcla 400 - 50%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	400,00	3100,00	0,129	400,00
Agua	200,00	1000,00	0,200	253,45
AFN	852,69	2544,00	0,335	858,57
AGN	426,34	2766,00	0,154	427,79
AGR	426,34	2347,00	0,182	428,52
SP	2,00	-	-	2,00
Total	2307,37	-	1,000	2370,34

Tabla 34. Diseño 400 - 100%.
Fuente. Propia.

Mezcla 400 - 100%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	400,00	3100,00	0,129	400,00
Agua	200,00	1000,00	0,200	270,93
AFN	819,09	2544,00	0,322	824,75
AGN		2766,00	0,000	0,00
AGR	819,09	2347,00	0,349	823,27
SP	2,00	-	-	2,00
Total	2240,19	-	1,000	2320,94

- Diseño de 500 kg/m³ con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR (ver Tabla 35, 36, 37 y 38).

Tabla 35. Diseño 500 - 0%.
Fuente. Propia.

Mezcla 500 - 0%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	500,00	3100,00	0,161	500,00
Agua	250,00	1000,00	0,250	280,26
AFN	780,15	2544,00	0,307	785,53
AGN	780,15	2766,00	0,282	782,80
AGR	0,00	2347,00	0,000	0,00
SP	2,50	-	-	2,50
Total	2312,79	-	1,000	2351,09

Tabla 36. Diseño 500 - 20%.
Fuente. Propia.

Mezcla 500 - 20%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	500,00	3100,00	0,161	500,00
Agua	250,00	1000,00	0,250	287,09
AFN	767,03	2544,00	0,302	772,32
AGN	613,62	2766,00	0,222	615,71
AGR	153,41	2347,00	0,065	154,19
SP	2,50	-	-	2,50
Total	2286,55	-	1,000	2331,80

Tabla 37. Diseño 500 - 50%.
Fuente. Propia.

Mezcla 500 - 50%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	500,00	3100,00	0,161	500,00
Agua	250,00	1000,00	0,250	296,90
AFN	748,15	2544,00	0,294	753,31
AGN	374,08	2766,00	0,135	375,35
AGR	374,08	2347,00	0,159	375,98
SP	2,50	-	-	2,50
Total	2248,80	-	1,000	2304,05

Tabla 38. Diseño 500 - 100%.
Fuente. Propia.

Mezcla 500 - 100%				
Dosificación peso seco (por m ³)				Corrección por humedad (kg)
Material	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	
Cemento	500,00	3100,00	0,161	500,00
Agua	250,00	1000,00	0,250	312,23
AFN	718,68	2544,00	0,282	723,64
AGN		2766,00	0,000	0,00
AGR	718,68	2347,00	0,306	722,34
SP	2,50	-	-	2,50
Total	2189,85	-	1,000	2260,71

7.2.2. Ensayos en estado fresco

7.2.2.1. Asentamiento

Este ensayo tiene como propósito medir el asentamiento del concreto en las diferentes mezclas realizadas a lo largo del proyecto, con el fin de analizar el impacto de la incorporación de RCD en este parámetro. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto cómo la introducción de agregado reciclado afecta la fluidez del material. El ensayo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 396 para garantizar un desarrollo adecuado del procedimiento y una obtención precisa de los resultados [35].

La disminución en la fluidez del concreto se atribuye principalmente a las características propias del agregado reciclado, como su alta capacidad de absorción debido a que en su matriz se encuentra una mayor cantidad de poros debido al mortero adherido como se ha mencionado anteriormente. Se observó que las mezclas que contienen 500 kg/m³ de cemento presentan una mayor fluidez, lo cual puede atribuirse a la proporción más elevada de pasta cementante en comparación con otras mezclas, debido a que el cemento es el componente principal para formar la pasta que integra los áridos; al incorporar mayor cantidad de cemento ocurre un aumento de pasta que llena los vacíos entre los áridos, lo que resulta en un mayor asentamiento como se puede evidenciar en la *Figura 28*.



350 - 0%



350 - 20%



350 - 50%



350 - 100%



400 - 0%



400 - 20%



400 - 50%



400 - 100%



500 - 0%



500 - 20%



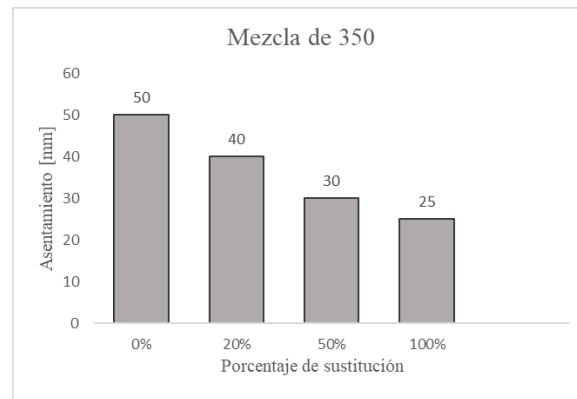
500 - 50%



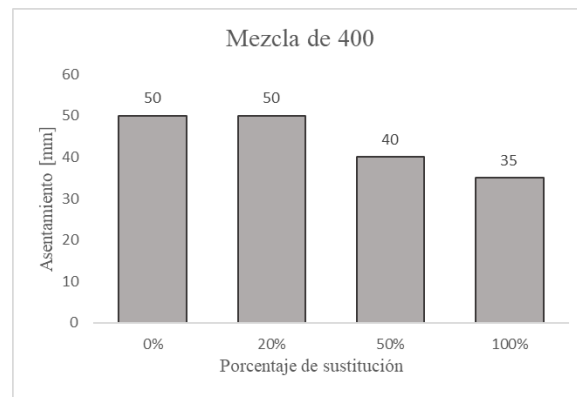
500 - 100%

Figura 28. Asentamientos.
Fuente. Propia.

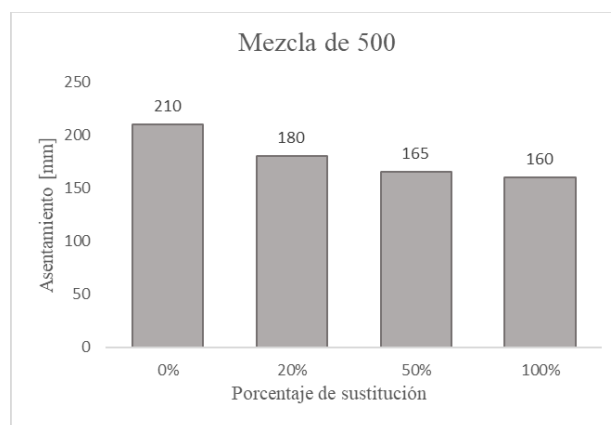
A continuación, se presentan gráficamente los valores de asentamiento de todas las mezclas en la *Figura 29, 30 y 31*.



*Figura 29. Asentamientos de la mezcla de 350 kg/m³.
Fuente. Propia.*



*Figura 30. Asentamientos de la mezcla de 400 kg/m³.
Fuente. Propia.*



*Figura 31. Asentamientos de la mezcla de 500 kg/m³.
Fuente. Propia.*

Se puede evidenciar en los resultados obtenidos que el asentamiento se ve ligeramente afectado a medida que se aumenta el reemplazo del agregado natural por el RCD debido a que su superficie es más rugosa y porosa, por lo cual, es mayor la cantidad de agua que absorbe el agregado de la mezcla de concreto, como se puede evidenciar en esta investigación [36] en donde se realizó un análisis a la literatura de este tipo de estudios en el que se observa la tendencia a disminuir el asentamiento con el porcentaje de reemplazo del RCD. Sin embargo,

se tiene en cuenta que al incorporar el superplastificante a la mezcla la trabajabilidad se mejora considerablemente, permitiendo que estas presenten un buen asentamiento. Por otro lado, algunos autores pudieron encontrar que al diseñar un concreto de alta resistencia el asentamiento se mantiene debido a la cantidad de pasta que recubre los agregados, lo que permite más fluidez y menos fricción entre ellos [37].

7.3.Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de concreto

Estos ensayos se realizan en el desarrollo de esta investigación con el fin de evaluar cómo influye la sustitución de AGR en las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado endurecido.

7.3.1. Ensayos mecánicos

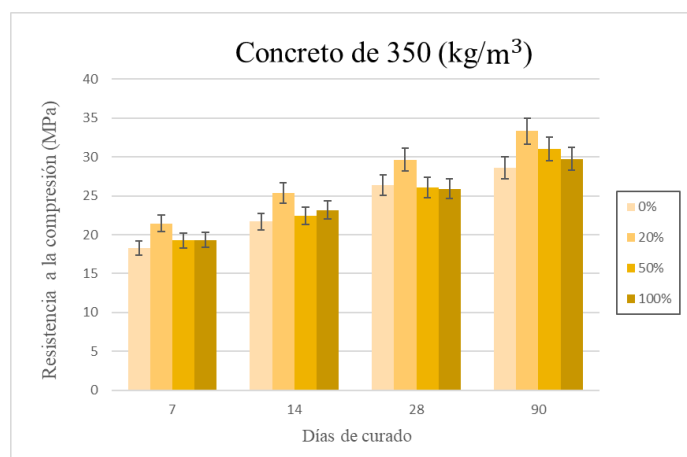
7.3.1.1. Resistencia a la compresión

Se desarrolló el ensayo según lo establecido en la NTC 673 donde se determinó las resistencias a los 7, 14, 28 y 90 días de curado para cada diseño de mezcla (350, 400 y 500 kg/m³) con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR [25]. A continuación, se ilustran en la *Tabla 39* los promedios de las resistencias obtenidas expresadas en MPa y sus respectivas desviaciones estándar.

*Tabla 39. Resultados de resistencia a la compresión.
Fuente. Propia.*

Mezclas	% AGR	Días				Desv. Estandar			
						Días			
		7	14	28	90	7	14	28	90
350 (kg/m ³)	0	18,30	21,67	26,36	28,57	0,21	0,14	0,11	0,98
	20	21,44	25,36	29,65	33,31	0,19	1,34	0,08	1,95
	50	19,27	22,40	26,07	31,03	0,37	0,62	1,04	0,35
	100	19,34	23,18	25,90	29,73	0,54	1,04	1,23	1,47
400 (kg/m ³)	0	22,53	28,80	32,66	36,71	0,37	0,52	1,07	0,01
	20	27,64	34,42	34,57	40,99	0,65	1,17	0,96	0,95
	50	27,08	32,17	35,30	40,26	0,56	3,21	0,06	0,83
	100	26,07	30,83	32,89	38,11	0,01	4,21	0,97	0,99
500 (kg/m ³)	0	27,10	34,10	37,67	42,81	1,14	1,47	0,01	0,21
	20	28,01	35,26	38,73	41,68	0,93	0,38	0,71	1,18
	50	27,78	33,20	39,03	42,68	0,54	1,39	0,06	0,52
	100	26,76	29,97	35,01	40,22	0,81	0,53	0,20	1,06

Para una mejor ilustración de los resultados, a continuación, se presentan los resultados en diagramas de barras, para cada diseño de mezcla en las edades mencionadas anteriormente (*ver Figura 32, 33 y 34*).



*Figura 32. Resistencia a compresión, mezcla de 350 kg/m³.
Fuente. Propia.*

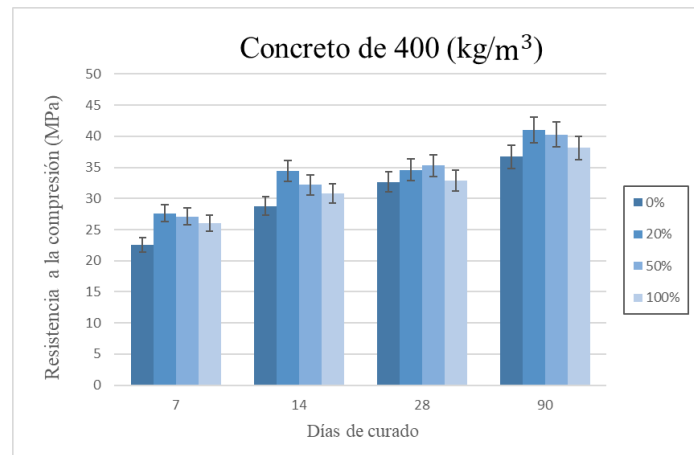


Figura 33. Resistencia a compresión, mezcla de 400 kg/m³.
Fuente. Propia.

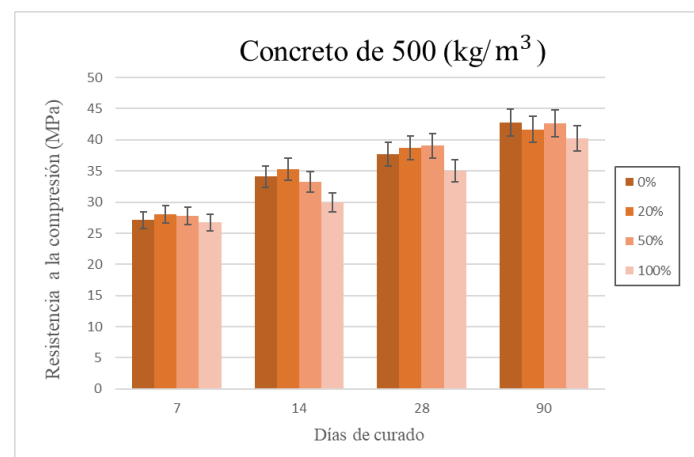


Figura 34. Resistencia a compresión, mezcla de 500 kg/m³.
Fuente. Propia.

De los datos obtenidos, se puede observar que el porcentaje óptimo de sustitución de AGR, con resultados superiores, es el 20%; el cual coincide con el porcentaje máximo a utilizar recomendado actualmente en concretos estructurales según la NTC 6421 [1], esto es coherente con los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del agregado reciclado contenidos en el ítem 7.1 del presente documento, donde se observa que el AGR tiene una naturaleza porosa con respecto al AGN, reflejado en mayores porcentajes de absorción, lo que significa que un porcentaje de sustitución por encima del 20% influye directamente en la resistencia a la compresión de los concretos.

Al analizar las resistencias correspondientes al 20% de sustitución para cada mezcla, se puede analizar que, a los 7 días de curado, se obtuvo un aumento del 17,16% para los concretos de baja resistencia, comparado con el resultado de la mezcla patrón que presentó 18,30 MPa, adicionalmente, un incremento del 22,68% para el concreto de resistencia media, con un valor de mezcla patrón de 22,53 MPa, y un 3,38% para los concretos de alta resistencia, con un valor patrón de 27,09 MPa. A la edad de 28 días, se tuvieron incrementos del 12,48%, 5,48% y 2,8% para los concretos de baja, media y alta resistencia, respectivamente.

Finalmente, a la edad de 90 días, se presenta un incremento en la resistencia del 16,6% y 11,67% para los concretos de baja y media resistencia respectivamente; teniendo como patrón, resistencias de 28,57 MPa para concretos de baja resistencia y 36,71 MPa para concretos de resistencia media; con un efecto contrario, para el concreto de alta resistencia, sobre el cual se obtuvo una disminución en la resistencia de un 2,62% sobre el valor patrón de 42,81 MPa. No obstante, el porcentaje de disminución no representa un problema el cual afecte significativamente la calidad del concreto.

Respecto a los demás porcentajes de sustitución (50% y 100%), a partir de los resultados obtenidos se puede deducir que la incorporación del AGR parcial y totalmente no afecta significativamente el desempeño mecánico del concreto, con lo que se puede concluir que los valores de resistencia obtenidos presentan excelentes resultados y son considerados aceptables para uso estructural, superando incluso a la edad de 7 días, la resistencia mínima (17 MPa) para un concreto estructural establecida por la NSR -10, TITULO C [34], este buen desempeño se puede atribuir a la resistencia especificada del concreto (21 MPa) del cual se obtuvo el agregado grueso reciclado.

Con fines comparativos, en la investigación realizada por el Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle [16] se realizaron diseños de mezcla con el fin de alcanzar una resistencia mínima a la compresión de 35 MPa con sustituciones en peso del 25, 50 y 100% de AGR obtenidos a partir de la trituration de RCDs provenientes de actividades de demolición en la Universidad del Valle, donde se puede evidenciar una disminución en la resistencia en comparación con los valores obtenidos en este proyecto de aproximadamente el 12% para el 25 y 50% de sustitución y un 25% para el 100% de sustitución; estos resultados se pueden atribuir a que los AGR utilizados en este proyecto de grado provienen de una fuente confiable con resistencia conocida, lo que podría significar un aporte significativo en resistencia al nuevo concreto.

A partir de la recopilación de las resistencias, se evidencia que la mezcla con mejores resultados es la de 400 kg/m³ debido a que el incremento en la resistencia con respecto a la mezcla de 350 kg/m³ es significativo sin representar un incremento considerable en el peso del cementante usado en los diseños; por otra parte, al compararlo con los resultados de la mezcla de 500 kg/m³, se puede observar que las resistencias obtenidas son muy similares a pesar de que la mezcla de 500 kg/m³ presenta mayor contenido de material cementante, por lo que se deduce que en el concreto diseñado, el desempeño está mayormente influenciado por la relación agua/cemento más que la cantidad de cemento. También cabe mencionar que los diseños de mezcla se realizaron usando el método de volumen absoluto, lo que significa que al aumentar la cantidad de cemento (pasta) se reduce la cantidad de agregados y esto puede influir en la cantidad de poros del concreto debido a que la pasta presenta una naturaleza porosa comparada con los AGN y en menor medida, los AGR. Lo cual puede influir directamente en la resistencia del concreto debido a que los poros actúan como zonas débiles afectando la distribución uniforme de las cargas.

Los tipos de falla presentados en los cilindros de concreto ensayados según lo establecido en la NTC 673 corresponden en su mayoría a una falla tipo 4 a excepción de la probeta 400-50% la cual presenta una falla tipo 3; la falla tipo 4 se caracteriza por ser una fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos y la tipo 3 presenta fisuras verticales columnares a través de ambos extremos. En la *Figura 35* se puede evidenciar el tipo de falla [25].

350 - 0%	350 - 20%
	
350 - 50%	350 - 100%
	
400 - 0%	400 - 20%



400 - 50%



400 - 100%



500 - 0%



500 - 20%



500 - 50%



500 - 100%

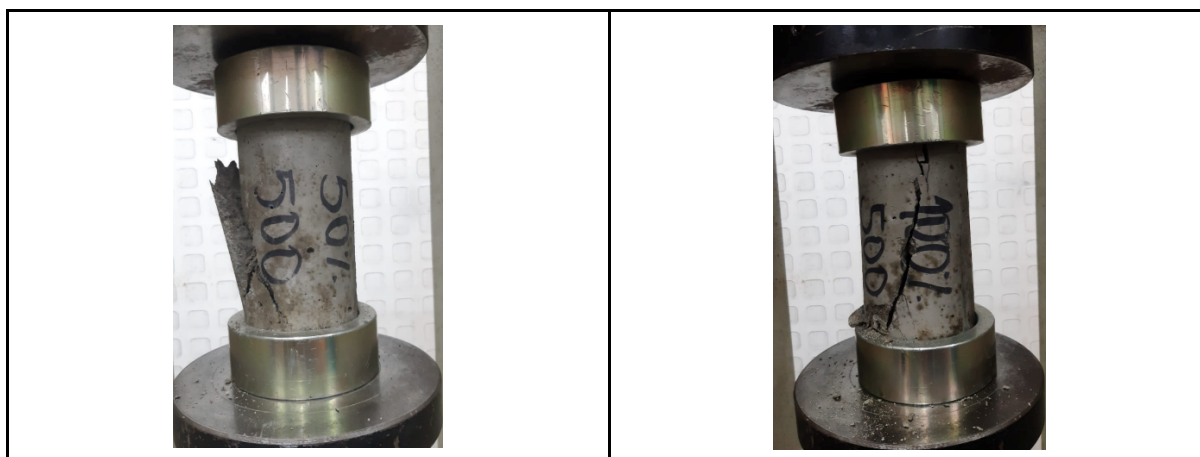


Figura 35. Fallas de las muestras ensayadas a compresión.

Fuente. Propia.

7.3.2. Ensayos físicos

7.3.2.1. Densidad, absorción y porosidad

Por medio de este ensayo se determinó la gravedad específica, absorción y los vacíos en el concreto en estado endurecido, según lo establecido en la NTC 5653 [26]. Los resultados se ilustran en la *Tabla 40*.

Tabla 40. D, A y P en estado endurecido.

Fuente. Propia.

Mezcla	% AGR	Absorción después de inmersión %	Densidad aparente, (g/cm ³)	Volumen de poros permeable %	Desv. Absorción	Desv. Densidad	Desv. Volumen de poros
350 (kg/m ³)	0	7,40	2,69	16,84	0,21	0,01	0,27
	20	7,17	2,65	16,23	0,14	0,01	0,20
	50	8,09	2,62	17,72	0,19	0,02	0,41
	100	9,26	2,58	19,52	0,29	0,02	0,65
400 (kg/m ³)	0	7,10	2,68	16,43	0,04	0,00	0,09
	20	6,56	2,69	14,88	0,20	0,01	0,69
	50	7,60	2,65	15,18	0,24	0,01	3,93
	100	8,92	2,62	19,44	0,37	0,02	0,24
500 (kg/m ³)	0	7,72	2,71	18,23	0,34	0,02	0,65
	20	8,07	2,71	18,70	0,33	0,01	0,23
	50	8,88	2,61	18,89	1,33	0,03	2,23
	100	10,78	2,61	22,04	0,81	0,01	1,19

A continuación, se ilustra de manera gráfica los valores obtenidos en la *Tabla 40* para el porcentaje de absorción, densidad aparente y porcentaje de volumen de poros permeables (ver *Figura 36, 37 y 38*).

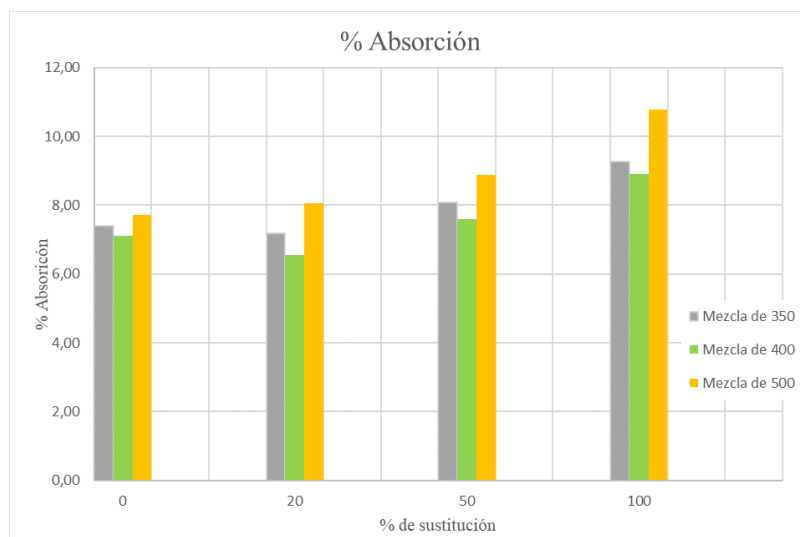


Figura 36. Porcentajes de absorción del concreto en estado endurecido
Fuente. Propia

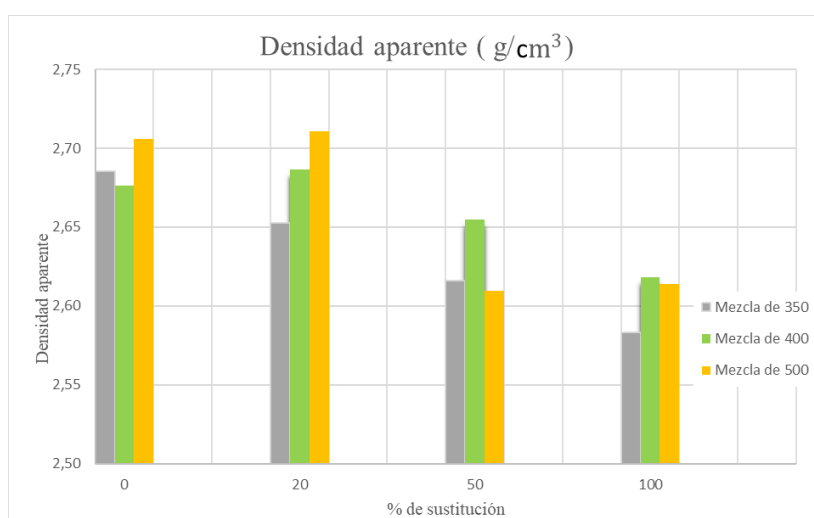


Figura 37. Densidad aparente del concreto en estado endurecido
Fuente. Propia

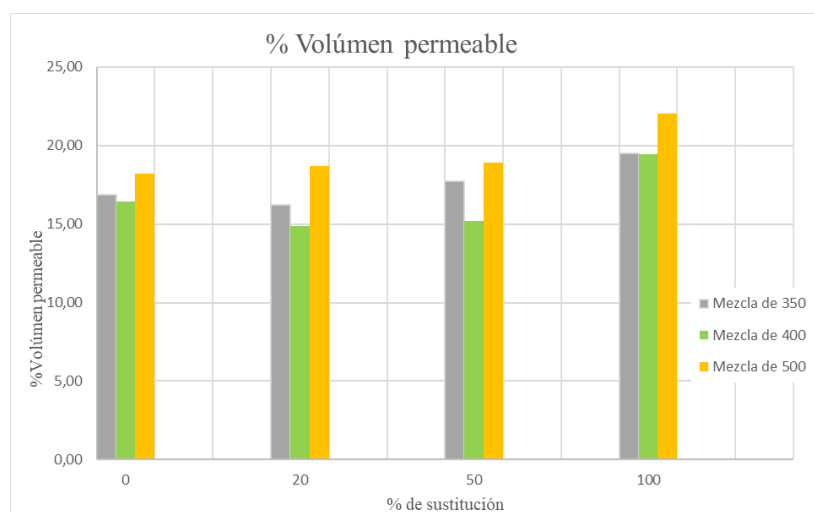


Figura 38. Porcentaje de volumen de poros del concreto en estado endurecido
Fuente. Propia

El comportamiento de las mezclas de concreto que se obtuvo fue el esperado para la mayoría de sustituciones, debido a que a medida que se presenta un incremento en el porcentaje de RCD se aumenta la cantidad de poros como consecuencia del material que se encuentra en la superficie del agregado reciclado, ya que presenta una calidad inferior comparada con la superficie del agregado natural, condición que influye directamente en los valores para absorción, los cuales, al igual que la propiedad descrita inicialmente, presentan un incremento en sus valores debido a que el mortero adherido presenta una superficie más porosa por la cantidad de vacíos presentes que pueden absorber una mayor cantidad de agua, resultados que difieren con el 20% de sustitución para las mezclas de 350 y 400 kg/m³, donde se obtuvo para el concreto de baja resistencia, un incremento de 3, 1 y 4% para la densidad, absorción y cantidad de poros respectivamente y una disminución del 8 y 10% para la absorción y volumen de poros del concreto de resistencia media. En contraste con lo reportado en la literatura, esta tendencia puede ser atribuida a que posiblemente un incremento de AGR representa una mejora en la distribución granulométrica de la combinación de áridos presentes en la mezcla lo que se puede ver reflejado en una menor cantidad de vacíos entre los agregados como se muestra en el *ítem 7.2*.

Por otro lado, las mezclas de 500 kg/m³ presentan el comportamiento esperado para todos los porcentajes de sustitución; adicionalmente, se observa que estas mezclas presentan una mayor porosidad en comparación con las mezclas de 350 y 400 kg/m³, lo que se puede atribuir a que los diseños de mezcla se llevaron a cabo utilizando el método de volumen absoluto. Esto implica que, al incrementar la cantidad de pasta cementante, se disminuye la cantidad de agregados. Esta variación puede aumentar la cantidad de poros en el concreto, dado que la pasta tiene una naturaleza más porosa en comparación con los agregados gruesos naturales y, en menor medida, con los AGR.

A partir de estos resultados, se puede evidenciar que independientemente del contenido de cemento, entre mayor contenido de AGR, mayor será el porcentaje de volumen de poros permeables, lo que genera una disminución en la densidad del concreto y un incremento en el porcentaje de absorción; estos datos se asemejan a los resultados obtenidos en una investigación elaborada en la Universidad del Valle por el Grupo de Materiales Compuestos [16], la cual fue realizada con el fin de analizar el comportamiento en estado fresco y endurecido de un concreto autocompactante elaborado con AGR; en esta se atribuye este comportamiento a la porosidad del mortero adherido a los AGR que genera una disminución de la densidad comparada con el AGN; esto concuerda con los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados obtenidos en el *ítem 6.1.4* de este proyecto de grado, donde se observa una disminución en la densidad y un incremento en la absorción de los AGR, lo que consecuentemente influye en los resultados obtenidos en el concreto en estado endurecido ya que se genera una modificación en la matriz de la mezcla debido al mortero endurecido adherido a los AGR y al proceso de trituración al que fue sometido, provocando una disminución en la resistencia del concreto final debido a factores como la porosidad y posibles grietas que aumentan su capacidad de absorción y disminuyen su densidad afectando su compacidad y permeabilidad.

7.3.2.2. Succión Capilar

A continuación, se puede observar los resultados obtenidos de la prueba de succión capilar, la cual se realizó para cada diseño de mezcla (350, 400 y 500 kg/m^3) con sustituciones del 0, 20, 50 y 100% de AGR; se tomaron datos a tres diferentes muestras para cada porcentaje de sustitución, los cuales se promediaron y con estos resultados se generaron las siguientes gráficas, que ilustran los valores de absorción de las muestras en el tiempo.

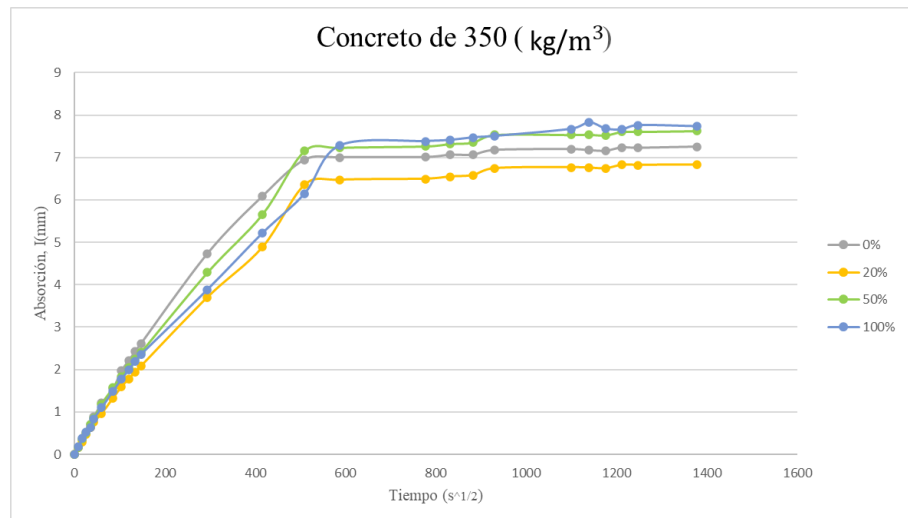


Figura 39. Succión capilar, 350 kg/m^3 .
Fuente. Propia.

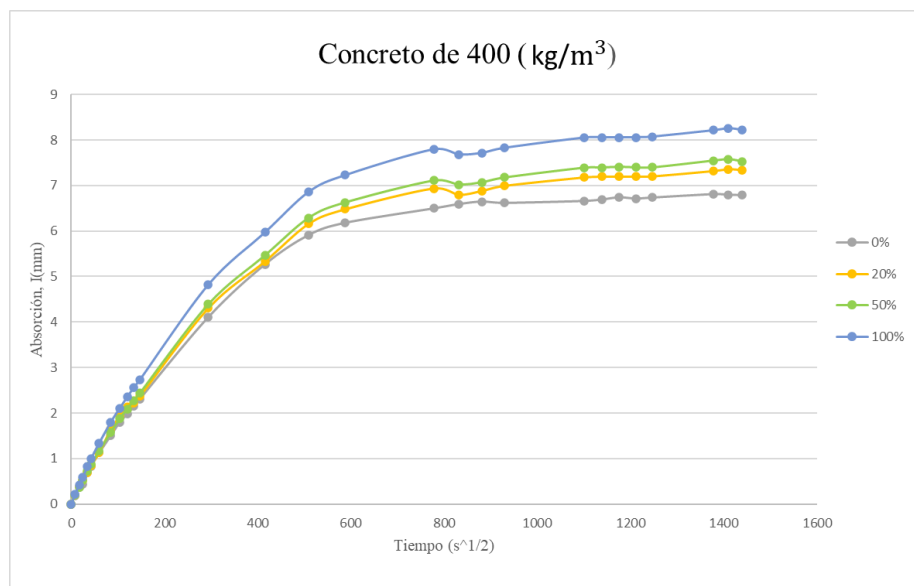


Figura 40. Succión capilar, 400 kg/m^3 .
Fuente. Propia.

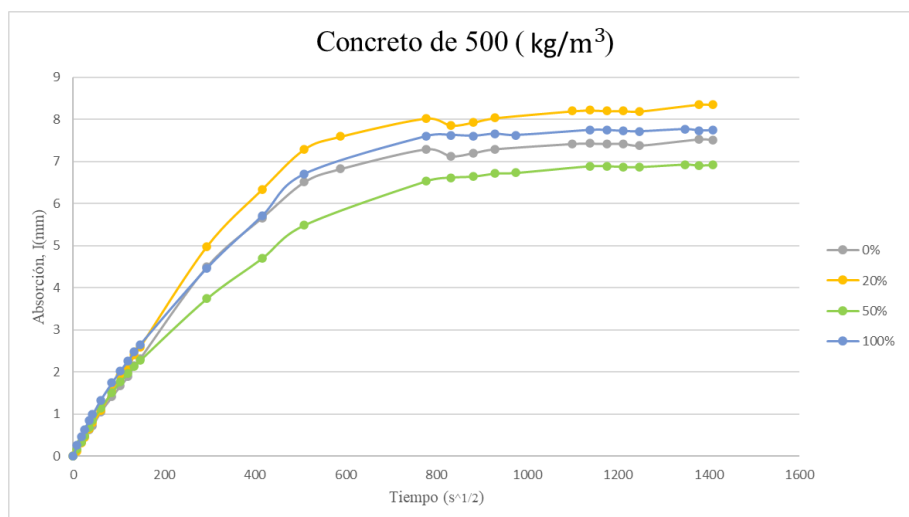


Figura 41. Succión capilar, 500 kg/m³.
Fuente. Propia.

A partir de las gráficas se puede observar que, según incrementa el porcentaje de sustitución de AGR, aumenta la capacidad de absorción; generalmente la mezcla que presenta mayor absorción es la que contiene el 100% de sustitución del agregado reciclado tal como lo demuestra el estudio realizado en LEMIT [38]; dichos resultados están directamente relacionados con los datos de absorción obtenidos en la caracterización de los agregados y en los resultados obtenidos para el concreto en estado endurecido, donde se concluye que esto se debe a la cantidad de poros que presenta el RCD en el concreto adherido. Cabe mencionar que la tendencia de la mezcla de 500 kg/m³ no es la esperada, ya que presenta mayor absorción para el 20% de sustitución, resultado que es irregular y se puede atribuir a un error experimental, ya sea en la aplicación de las capas de Acronal o que la mezcla tuviera una alta cantidad de poros por falta de vibración a la hora del vertido en el molde, entre otros.

Lo mencionado anteriormente se puede observar en los siguientes resultados de tasa de absorción.

Tabla 41. Tasa de absorción inicial
Fuente. Propia.

Tasa de absorción		
Mezclas	% de sustitución	Inicial (mm/ s ^{1/2})
350	0	0,0178
	20	0,0142
	50	0,0163
	100	0,0159
400	0	0,0157
	20	0,0165
	50	0,0165
	100	0,0185
500	0	0,0155
	20	0,0178
	50	0,0155
	100	0,0176

Tabla 42. Tasa de absorción secundaria.
Fuente. Propia.

Tasa de absorción		
Mezclas	% de sustitución	Secundaria (mm/ s ^{1/2})
350	0	0,0015
	20	0,0021
	50	0,0022
	100	0,0029
400	0	0,0016
	20	0,0017
	50	0,0017
	100	0,0019
500	0	0,0021
	20	0,0022
	50	0,0024
	100	0,0022

A partir de los resultados recopilados en la *Tabla 41* y *Tabla 42* se puede evidenciar que para las diferentes mezclas los valores obtenidos para la tasa de absorción inicial no presenta mayor diferencia debido que en este periodo de tiempo la probeta se satura superficialmente, siendo el fenómeno de sortividad gobernado por la pasta superficial (efecto pared); en los valores obtenidos para la tasa de absorción secundaria se observa que la mezcla de 400 kg/m³ presenta menor absorción lo que coincide con los resultados obtenidos en los ensayos de absorción y porosidad del concreto en estado endurecido, donde se evidencia que esta mezcla presenta mejores propiedades físicas viéndose reflejado en su desempeño mecánico.

7.3.2.3. Pulso ultrasónico

Este ensayo fue llevado a cabo según lo establecido en la ASTM C597 [28] donde se busca evaluar la uniformidad y la calidad del concreto. Los resultados obtenidos para una distancia de 152 mm (6") fueron los indicados en la *Tabla 43*.

Tabla 43. Resultados del ensayo de Pulso ultrasónico.
Fuente. Propia.

Mezclas	% AGR	Promedio de Tiempo (μs)	Promedio de Velocidad (m/s)	Desv. Tiempo	Desv. Velocidad	Módulo de elasticidad dinámico (Gpa)
350 (kg/m ³)	0	34,9	4363,5	0,2	26,2	38,08
	20	35,2	4320	0,1	17,0	37,32
	50	37,0	4110,5	0,6	62,9	33,79
	100	38,1	3996,5	0,5	51,6	31,94
400 (kg/m ³)	0	34,8	4376	0,2	26,9	38,30
	20	34,7	4382	0,1	18,4	38,40
	50	35,9	4241,5	0,5	58,7	35,98
	100	36,9	4122	1,0	110,3	33,98
500 (kg/m ³)	0	34,7	4389	0,6	80,6	38,53
	20	35,9	4235,5	0,3	33,2	35,88
	50	35,9	4235,5	0,1	16,3	35,88
	100	37,4	4066,5	0,6	61,5	33,07

En la *Figura 42* se pueden observar gráficamente los resultados obtenidos para este ensayo reportados en *Tabla 43*.

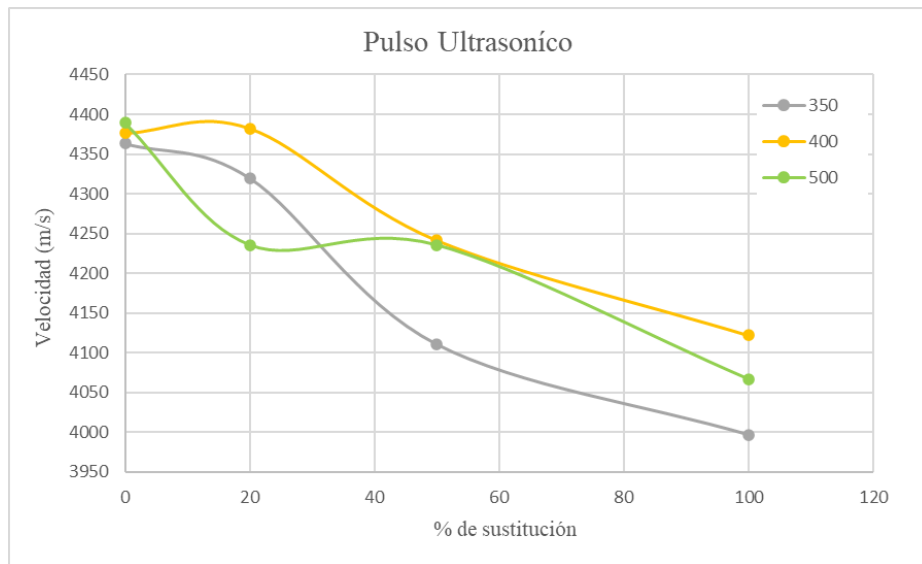


Figura 42. Velocidad de pulso ultrasónico
Fuente. Propia

Al observar los valores obtenidos para los módulos de elasticidad (E_d), se puede ver que todas las mezclas presentan la misma tendencia; según incrementa el porcentaje de sustitución, los módulos de elasticidad disminuyen. Como se menciona en [39], esto ocurre debido a que mientras incrementa la cantidad de AGR, disminuye el valor del E_d , ya que el aumento en la porosidad de los AGR genera una variación en la microestructura del concreto que puede relacionarse con el aumento de fisuras en la matriz. Independientemente de las disminuciones presentadas, los valores obtenidos son considerados óptimos, ya que para un concreto estructural con resistencias a la compresión entre 21 y 40 MPa suelen tener un módulo de elasticidad entre 20 y 30 GPa.

Siendo coherente con lo anterior, al analizar la *Figura 42* se observa que al incrementar el contenido de AGR las velocidades disminuyen; teniendo como referencia la *Tabla 44*, la cual presenta la clasificación del concreto según los valores de velocidad ultrasónica. Con los resultados obtenidos se puede concluir que todas las mezclas se clasifican como concretos de buena calidad, es decir que presentan una densidad y uniformidad favorables; y no se identifican discontinuidades tales como presencia de grietas y vacíos significativos en el concreto; estos resultados concuerdan con los datos obtenidos por Carlos Bedoya y Luis Dzúl [17] en el ensayo de pulso ultrasónico el cual se realizó a los cilindros de concreto con diferentes porcentajes de sustitución y donde se le atribuye a todas las muestras una clasificación de concreto buena.

Tabla 44. Clasificación del concreto según la Velocidad ultrasónica.
Fuente. [40].

Clasificación del concreto	Excelente	Bueno	Cuestionable	Pobre	Muy pobre
Velocidad ultrasónica, V (m/s)	$V > 4575$	3660 a 4575	3050 a 3660	2135 a 3050	$V < 2135$

7.3.2.4. Macroestructura del concreto.

De la macroestructura realizada, en la *Figura 43* se puede observar que la interfaz es buena y no es evidente la presencia de fisuras o vacíos grandes que puedan indicar problemas de compactación considerables, de esto se puede inferir que el concreto presentó buena homogeneidad en la mezcla, lo que conlleva a una buena consistencia y distribución de la pasta cementante con los agregados.

En la siguiente ilustración se evidencia la zona de transición entre el mortero adherido al agregado reciclado y la pasta cementante del nuevo concreto.

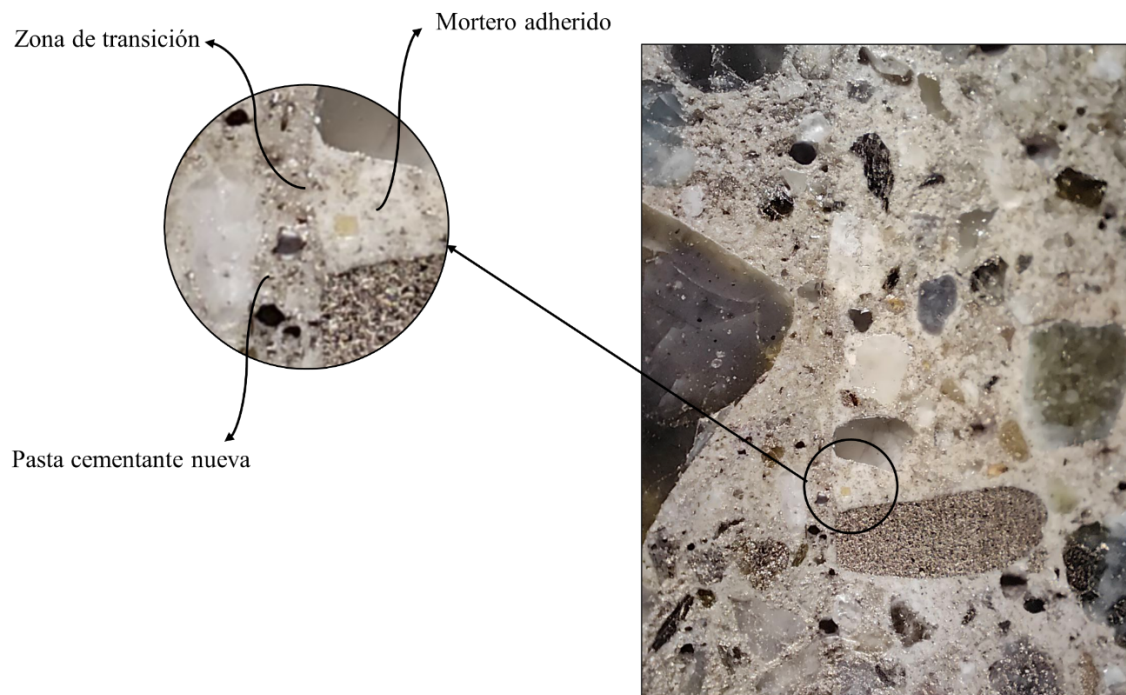
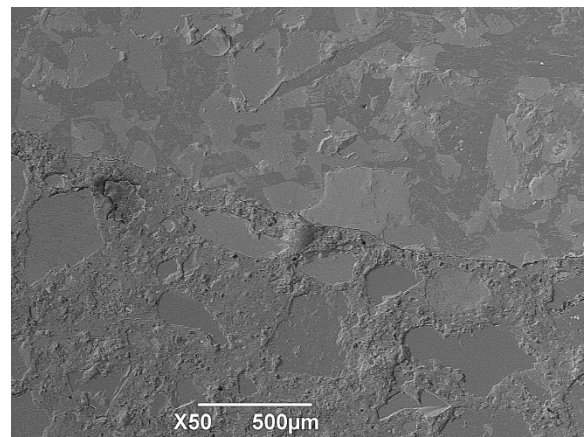
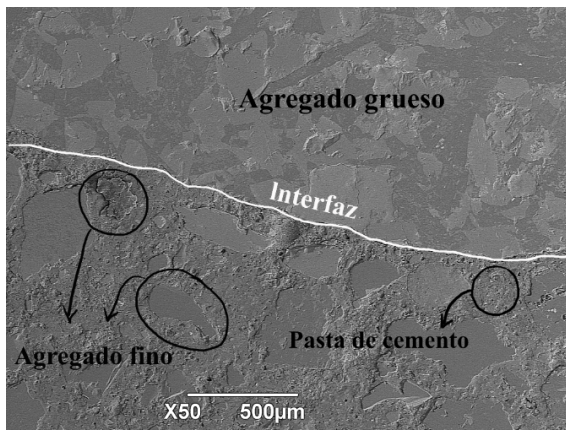


Figura 43. Macroestructura del concreto.
Fuente. Propia.

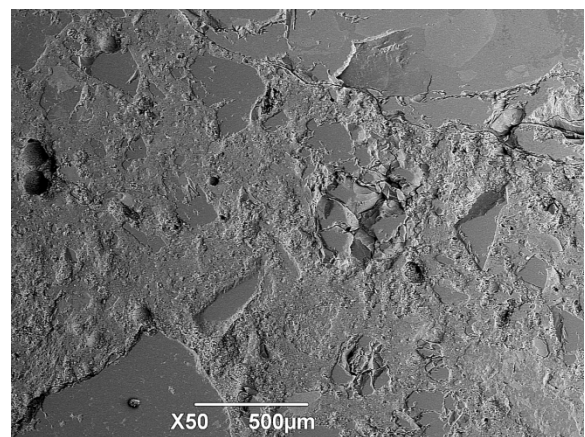
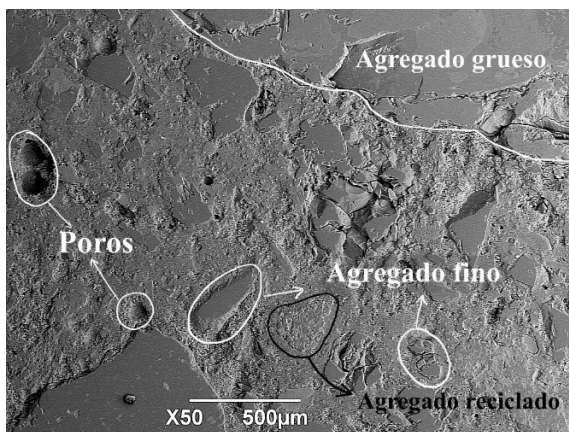
7.3.2.5. Microscopía SEM.

A partir de las imágenes obtenidas en este ensayo (*ver Figura 44*), se puede observar que las mezclas presentan una buena interfaz entre la pasta de cemento y el agregado grueso reciclado. Enfatizando en el concreto de 350 kg/m^3 se puede evidenciar que presenta una mayor porosidad y rugosidad en la mezcla de 100% de sustitución en comparación con la de 0%, ya que como se ha mencionado antes, el AGR al presentar mayor porosidad requiere de más agua de hidratación lo que se ve reflejado en mayor cantidad de poros; para las mezclas de 400 y 500 kg/m^3 se observa la misma tendencia, diferenciando que en estas se presentan algunas grietas en la matriz lo cual puede ser producto debido a la preparación de las probetas. Una diferencia notoria que se puede ver entre las tres mezclas es la cantidad de pasta en la matriz, donde se evidencia que para la mezcla de 500 kg/m^3 luce una matriz más compacta y presenta una integración más homogénea entre la pasta y los agregados finos que la mezcla de 400 kg/m^3 y 350 kg/m^3 .

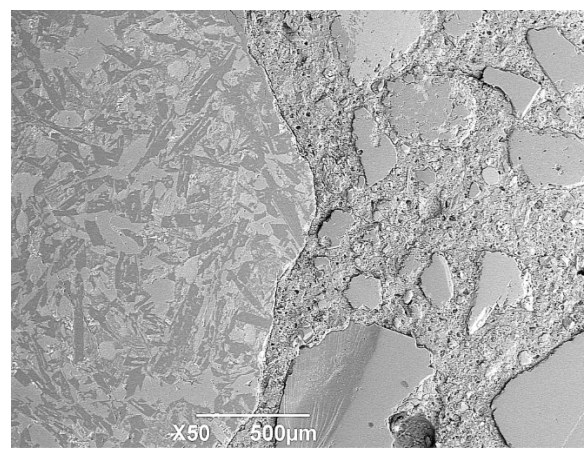
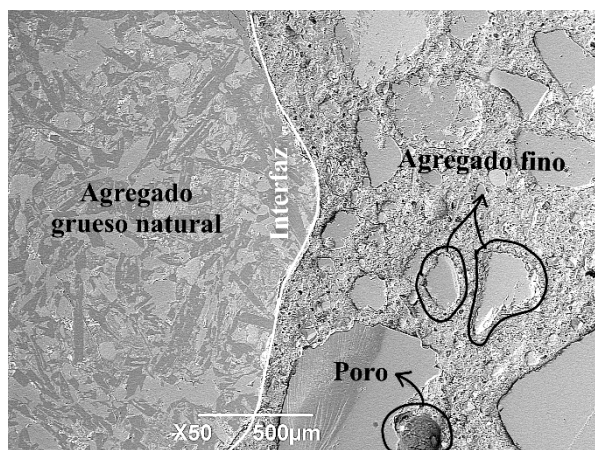
350 - 0%



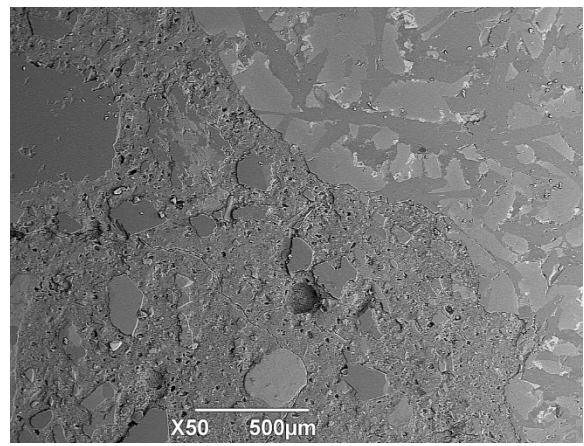
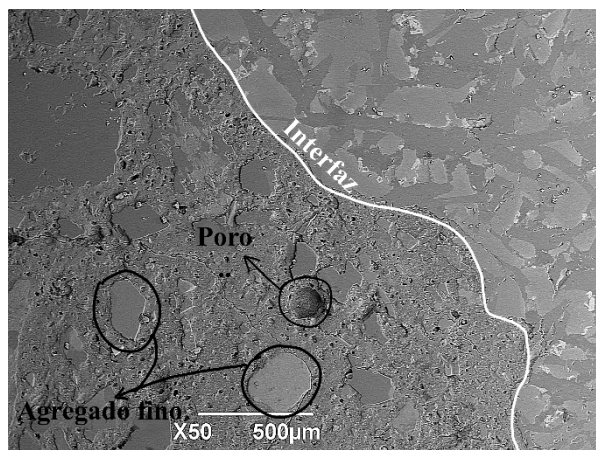
350 - 100%



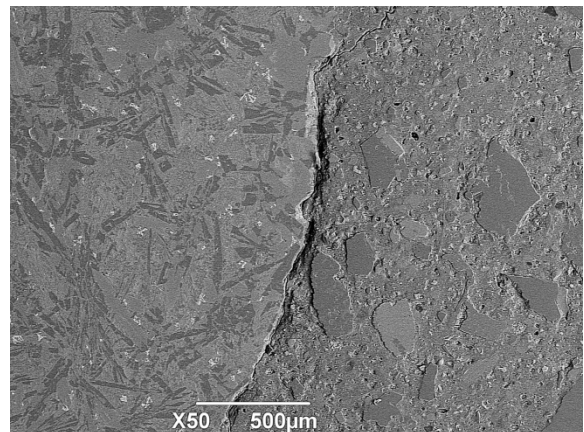
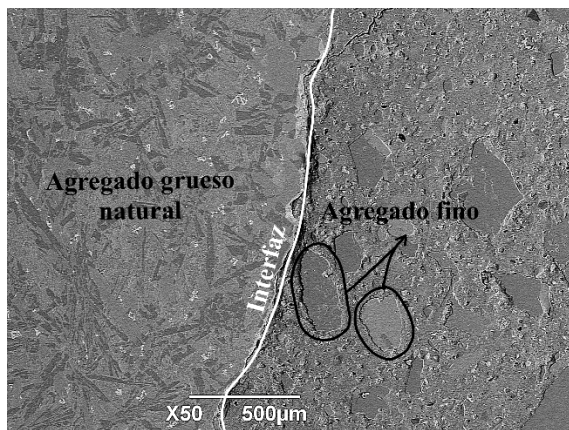
400 - 0%



400 - 100%



500 - 0%



500 - 100%

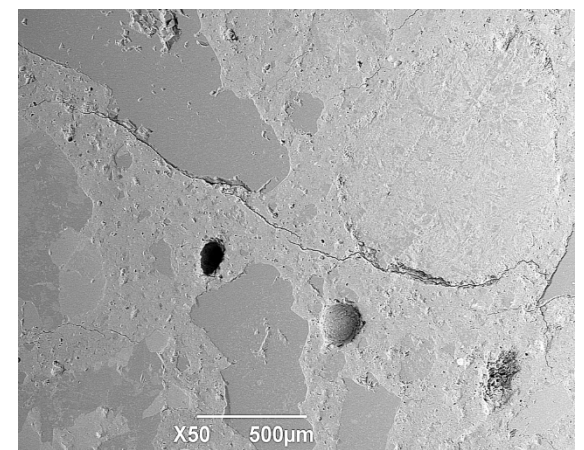
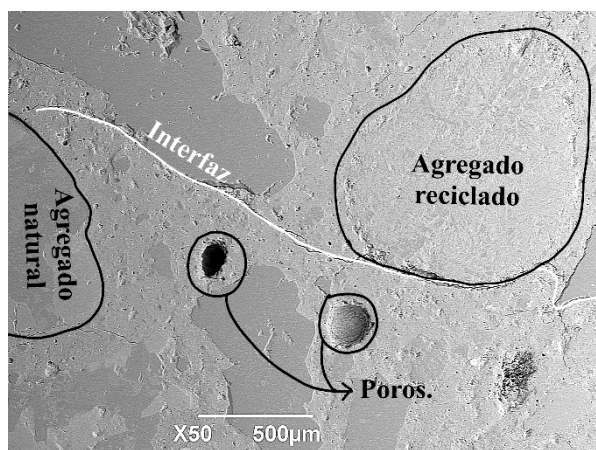


Figura 44. Microestructura del concreto.
Fuente. Propia.

8. CONCLUSIONES

El propósito de esta investigación fue determinar el efecto de la incorporación de un AGR de resistencia (calidad) conocida sobre el comportamiento fisicomecánico de concretos de baja (21 MPa), media (28 MPa) y alta resistencia (35 MPa); de los resultados obtenidos se pueden sustraer las siguientes conclusiones:

- Las características de los agregados de concreto reciclado con respecto a los agregados gruesos naturales son diferenciales. En el caso del AGR se observó un porcentaje de absorción tres veces mayor que el porcentaje reportado por AGN debido a que hay mayor presencia de poros en su superficie (mortero adherido); también se puede concluir que los agregados reciclados presentan una menor resistencia al desgaste en relación con los agregados naturales, estas propiedades se atribuyen al contenido de mortero adherido en el AGR, y al proceso de trituración por el que se somete el residuos de concreto proveniente de los RCD.
- Se puede concluir que la sustitución de AGN por AGR de origen y calidad conocidos es totalmente viable, dado a que no afecta significativamente el desempeño mecánico del nuevo concreto, como se demostró en los resultados obtenidos en este trabajo de grado. Al comparar los valores de resistencia de la mezcla patrón con las mezclas que presentan porcentajes de sustitución de AGR, se puede observar que el concreto de 350 y 400 kg/m³ presenta mayor resistencia final al hacer la sustitución del 20, 50 y 100%. Para la mezcla de 500 kg/m³ por el contrario, se obtuvo una disminución en la resistencia del 2,62, 0,29 y 6,04% para el 20, 50 y 100% de sustitución, respectivamente. Este resultado se considera importante para responder a la pregunta de investigación, en el sentido de que es probable que el efecto del AGR de resistencia especificada de partida (21 MPa) presente una influencia positiva para concretos de baja (21 MPa) y media (28 MPa) resistencia, y negativa para concretos de alta resistencia (35 MPa). Fenómeno que justamente podría estar relacionado con la diferencia en resistencia del concreto utilizado como materia prima para la producción del AGR y la resistencia especificada para los nuevos concretos.
- Analizando los resultados se puede concluir que el porcentaje de sustitución con resultados más óptimos es el 20 % debido a que en las diferentes mezclas se presenta un menor porcentaje de absorción y porosidad. Adicionalmente, sus valores de resistencia presentan un incremento con respecto a la mezcla patrón, resultado positivo en comparación con los otros porcentajes de sustitución (50% y 100%). Este hallazgo concuerda con el porcentaje de sustitución recomendado por la NTC 6422 [7] para aplicaciones estructurales.
- La cantidad de agregado reciclado incorporado incrementa el volumen de poros permeables, lo que se ve reflejado en un aumento de la capacidad de absorción del concreto y una disminución en su densidad, no obstante, su desempeño mecánico no se ve afectado de manera significativa.

9. REFERENCIAS

- [1] NTC 6421-ICONTEC, *Agregado grueso reciclado para uso en el concreto hidráulico*. 2021.
- [2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, *Resolución 1257 del 2021*. 2021.
- [3] «DANE - Estadísticas de concreto premezclado». Accedido: 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado>
- [4] R. A. Robayo Salazar, P. E. Matthey Centeno, Y. F. Silva Urrego, D. M. Burgos Gali, y S. Delvasto Arjona, «Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento», *Tecnura*, vol. 19, n.º 44, pp. 157-170, abr. 2015, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12.
- [5] N. S. Perdomo, «Residuos de construcción y demolición (RCD), construcción en la ciudad de Bogotá y la metodología PMBOK».
- [6] Alcaldía de Santiago de Cali, *Decreto 0771*. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=41576>
- [7] NTC 6422-ICONTEC, *Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados*. 2021.
- [8] D. VELANDIA, «LO QUE DEBES SABER SOBRE EL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA», 360 EN CONCRETO. Accedido: 14 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/lo-que-debes-saber-sobre-el-concreto-de-alta-resistencia/>
- [9] Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, «Resolución 0472». 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-0472-de-2017.pdf>
- [10] Alcaldía de Santiago de Cali, «Decreto 0771 del 2023». [En línea]. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/documentos/1938/residuos-de-la-demolicion-y-construccion/>
- [11] Alcaldía de Cali, «Manual de Construcción Sostenible del Distrito de Santiago de Cali». [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/propuesta%20manual%20de%20construccion%20sostenible.pdf>
- [12] D. M. Rosero Alvarez, «Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de RCD, basado en normativa internacional y en el desarrollo de investigaciones de universidades colombianas», 2019.
- [13] A. C. Maldonado Guinea y A. J. Palomino Pinzón, «Sustitución experimental del agregado grueso de origen Pétreo, Por agregado grueso producto de residuos de construcción y demolición en la Ciudad de Bogotá, para la elaboración de concreto hidráulico», feb. 2018, Accedido: 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7824>
- [14] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, y M. Z. Sulieman, «Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties», *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, n.º 1, pp. 565-573, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.
- [15] N. C. Zúñiga y D. R. Picado, «Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos», *Métod. Mater.*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-11, 2022.
- [16] R. A. Robayo Salazar, P. E. Matthey Centeno, Y. F. Silva Urrego, y S. Delvasto Arjona, «Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado.», *Inf. Téc.*, vol. 78, n.º 2, 2014.

- [17] C. Bedoya y L. Dzul, «Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana», vol. 30, 2015.
- [18] D. Kryeziu, F. Selmani, A. Mujaj, y I. Kondi, «Recycled Concrete Aggregates: A Promising and Sustainable Option for the Construction Industry», *J. Hum. Earth Future*, vol. 4, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2023.
- [19] ICONTEC, «NTC 77 | PDF». Accedido: 27 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/270711042/NTC-77>
- [20] «Ntc 92 determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados by Wilson Fernando Muñoz - Issuu». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/wilson2996/docs/ntc_92_determinaci__n_de_la_masa_un
- [21] «NTC 127 Concretos. Método de Ensayo para Determinar las Impurezas Orgánicas en Agregado Fino para Concreto.pdf». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://1library.co/document/q5nml9jq-ntc-127-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-impurezas-organicas-en-agregado-fino-para-concreto-pdf.html>
- [22] «NTC 176-2019 Metodo de Ensayo para Determinar La Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y La Absorcion Del Agregado Grueso | PDF». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/639551290/NTC-176-2019-METODO-DE-ENSAYO-PARA-DETERMINAR-LA-DENSIDAD-RELATIVA-GRAVEDAD-ESPECIFICA-Y-LA-ABSORCION-DEL-AGREGADO-GRUESO>
- [23] «NTC 1776 Método de Ensayo para Determinar por Secado el Contenido Total de Humedad de los Agregados». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://1library.co/document/yewv0m7y-ntc-1776-metodo-de-ensayo-para-determinar-por-secado-el-contenido-total-de-humedad-de-los-agregados.html>
- [24] ASTM, *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM C131*. 2020. [En línea]. Disponible en: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0131_C0131M-20%7Cen-US
- [25] ICONTEC, *Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilindros de concreto. NTC 673*. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/normagrid.aspx>
- [26] *Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido. NTC 5653*. 2008. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/normagrid.aspx>
- [27] «Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/c1585-20.html>
- [28] ASTM, *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete C597*. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0597-22%7Cen-US>
- [29] K. McNeil y T. H.-K. Kang, «Recycled Concrete Aggregates: A Review», *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2013, doi: 10.1007/s40069-013-0032-5.
- [30] *NTC 174*.
- [31] ICONTEC, *Metodo de ensayo para determinar las impurezas organicas en agregado fino para concreto. NTC 127*. 2005. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/normagrid.aspx>

- [32] ICONTEC, *Método de ensayo para determinas la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso*. NTC176. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/normagrid.aspx>
- [33] P. Matthey, R. Robayo-Salazar, Y. Silva, N. Jaramillo, y S. Delvasto, «Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción», *Rev. Inf. Téc.*, vol. 78, pp. 121-127, dic. 2014.
- [34] «Título C NSR-10 del Decreto 926 del 19032010.pdf». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://camacol.co/sites/default/files/descargables/T%C3%ADtulo%20C%20NSR-10%20del%20Decreto%20926%20del%2019032010.pdf>
- [35] ICONTEC, *Ensayo para determinar el asentamiento del concreto*. NTC 396. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.bd.univalle.edu.co/normagrid.aspx>
- [36] J. Kim, «Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview», *Constr. Build. Mater.*, vol. 328, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127071.
- [37] Y. Jiang, B. Li, J. He, y A. Garcia Hernandez, «Properties and microstructure of packing-optimised recycled aggregate concrete with different cement paste or sand contents», *Constr. Build. Mater.*, vol. 344, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128178.
- [38] C. Zega, M. Sosa, y Á. Maio, *Hormigones con Agregados Reciclados*. 2018.
- [39] B. Schoppe, «Shrinkage & Modulus of Elasticity in Concrete with Recycled Aggregates», *Masters Theses*, jun. 2011, doi: 10.15368/theses.2011.62.
- [40] H. R. J. Machacua y R. R. Y. Rios, «Confiabilidad de la velocidad de pulso ultrasónico para análisis y comparación de la resistencia a compresión de concreto convencional con adición de fibra de acero y polipropileno», *Gac. Téc.*, vol. 24, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2023, doi: 10.51372/gacetatecnica241.2.