VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE ARENAS RECICLADAS MIXTAS PARA SU USO EN MEZCLAS DE CONCRETO

Estudiantes:
Daniel Andrés Acosta Gordillo
Javier Santiago Sarchi Guerrero

Documento final de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali, Colombia
2025

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE ARENAS RECICLADAS MIXTAS PARA SU USO EN MEZCLAS DE CONCRETOS

Estudiantes:
Daniel Andrés Acosta Gordillo
Javier Santiago Sarchi Guerrero

Documento final de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:
Dr. Ing. Rafael Andrés Robayo Salazar
Escuela de Ingeniería de Materiales
Grupo Materiales Compuestos (GMC)

Codirector:
Ph.D. Ruby Mejía de Gutiérrez
Escuela de Ingeniería de Materiales
Grupo Materiales Compuestos (GMC)

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali, Colombia
2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres Ana Guerrero y Javier Sarchi por apoyarme en este proceso, quiero agradecer a la Universidad del Valle por darme la oportunidad de pertenecer a su facultad de ingeniería, agradecer a todos los profesores que nos acompañaron e hicieron parte de este proceso de formación, agradecer a nuestros directores de tesis por el apoyo brindado en nuestro trabajo de grado. También agradezco muy profundamente el apoyo de la profe Marisol aportando su conocimiento para el desarrollo de nuestra tesis. También un agradecimiento a todos mis compañeros y amigos por hacer parte de este camino que recorrimos en nuestra alma mater, así como también agradecimiento a los compañeros del laboratorio de materiales por su colaboración y orientación en el laboratorio cuando fue requerida. Pero en especial quiero agradecer a mi mamá Ana por haber confiado y tener fe en mí para dejarme salir de casa a la ciudad para empezar un pregrado en la universidad el cual estamos por culminar.

Quiero agradecer primero a Dios, a mis padres Benjamin Acosta y Normallin Gordillo por la paciencia y el apoyo brindado en todo este camino, a mi tía Marisol por estar siempre ahí para mí.

A mis compañeros, Armando, Fabio, Nicolas, Aux que siempre estuvieron dispuestos para ayudarnos.

A nuestros directores de trabajo de grado, PhD. Rafael Robayo y PhD. Ruby Mejía, por guiarnos y brindarnos apoyo en todo el desarrollo de la investigación.

A Valentina Mejía, Nicolas Gomez, Isabella Aguilera, Julio, Sarchi, Serna y todos los demás amigos que hice por mi paso por la U con los cuales vivimos momentos inolvidables.

Y por último a la Universidad Del Valle y al programa de ingeniería civil por contribuir a nuestro crecimiento académico y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 3
RESUMEN 8
1. INTRODUCCIÓN 9
2. PROBLEMA 12
2.1. Descripción 12
2.2. Formulación 14
3. OBJETIVOS 15
3.1. Objetivo General 15
3.2. Objetivos Específicos 15
4. ESTADO DEL ARTE 16
4.1. Marco Teórico 16
4.1.1. Agregados para concreto. 16
4.1.2. Teoría de empaquetamiento y distribución ideal “Fuller Thompson”. 16
4.1.3. Limites granulométricos de NTC 174. 16
4.1.4. Efecto de los AFR en estado fresco. 17
4.1.5. Efecto de los AFR en las propiedades físicas y mecánicas (estado endurecido). 17
4.1.6. Efecto de los AFR en la durabilidad del concreto. 18
4.2. Antecedentes 18
5. METODOLOGÍA 24
5.1. Caracterización de las materias primas 24
5.1.1. Recolección y adecuación de las materias primas 24
5.1.2. Caracterización de las materias primas 25
5.2. Diseño y fabricación de las mezclas de concreto 25
5.2.1. Diseño de experimentos 25
5.2.2. Modelo del experimento 27
5.3. Determinación de las propiedades del concreto 28
5.3.1. Ensayo En Estado Fresco 28
5.3.2. Ensayos En Estado Endurecido 28
5.4. Aplicación constructiva 29
6. RESULTADOS 30

6.1. Caracterización de la materia prima 30
6.2. Determinación del desempeño físico/mecánico de los concretos con reemplazos del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del AFN por AFR. 35
6.2.1. Caracterización en estado fresco del concreto 38
6.2.2. Resistencia a la compresión. 41
6.2.3. Modelación y optimización de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado 42
6.2.4. Caracterización física de los concretos 48
6.2.5. Caracterización microestructural 50
6.3. Aplicación constructiva 51
7. CONCLUSIONES 57
8. BIBLIOGRAFIA 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Redes Bibliométricas. Fuente: propia. 19
Figura 2. Cantidad de documentos publicados VS año. Fuente: propia. 20
Figura 3. País VS Cantidad de documentos publicados. Fuente: propia. 20
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: propia. 24
Figura 5. Esquema de las materias primas utilizadas 25
Figura 6. Curva de distribución granulométrica del Agregado Grueso. 30
Figura 7. Curva de distribución granulométrica de los Agregados Finos. 31
Figura 8. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RCe 36
Figura 9. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RCo 36
Figura 10. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RL 37
Figura 11. Imágenes de asentamiento C-Ref. 39
Figura 12. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RCe. 39
Figura 13. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RCo. 40
Figura 14. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RL. 40
Figura 15. Resistencia a la compresión. 41
Figura 16. Optimización de la resistencia a la compresión para cada uno de los materiales utilizados. 47
Figura 17. Optimización personalizada de la resistencia a la compresión para el AFR, AFN y AGN. 48
Figura 18. Curvas de absorción capilar en concretos. 50
Figura 19. Microestructura de las mezclas. 51
Figura 20. Sección transversal viga reforzada 52
Figura 21. Cargas aplicadas sobre la viga. 53
Figura 22. Diagrama de cortante. 53
Figura 23. Diagrama de momento. 53
Figura 24. Montaje de ensayo. 54
Figura 25. Apoyo a 10 cm de la cara lateral. 55
Figura 26. Diagrama momento-curvatura. 56
Figura 27. Gráfica carga- deformación C-Mix vs C-Ref. 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limites granulométricos para un agregado fino. Fuente: NTC 174. 17
Tabla 2. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RCe. 26
Tabla 3. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RCo. 26
Tabla 4. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RL. 26
Tabla 5. Descripción del diseño de mezclas vértices extremos. 27
Tabla 6. Composición química por FRX del OPC. 30
Tabla 7. Módulo de finura agregados finos. 31
Tabla 8. Módulo de finura de los AFR combinados utilizados en las mezclas de concreto. 32
Tabla 9. Propiedades físicas de los agregados 33
Tabla 10. Contenido de materia orgánica de AFR y AFN. 33
Tabla 11. Información Superplastificante Sika Plast – 5500. 35
Tabla 12. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RCe 37
Tabla 13. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RCo 38
Tabla 14. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RL 38
Tabla 15. Relación de las resistencias a compresión Concretos con AFR / C-Ref 42
Tabla 16. Coeficientes de regresión estimados de resistencia a la compresión, usando AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL (pseudocomponentes). 42
Tabla 17. Análisis de varianza para el modelo lineal utilizando AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL 44
Tabla 18. Estadísticas descriptivas de la resistencia a la compresión 45
Tabla 19. Condiciones de la optimización. 46
Tabla 20. Resistencia a la compresión 28 días C-Mix 48
Tabla 21. Resultados ensayo absorción, densidad y porosidad. 49
Tabla 22. Diseño de mezcla Viga mix, Viga Ref 52

RESUMEN

La presente investigación evaluó el comportamiento de concretos elaborados con diferentes tipos de agregado fino reciclado (AFR), provenientes de residuos de cerámica (AFR-RCe), concreto (AFR-RCo) y ladrillo (AFR-RL), como reemplazo del agregado fino natural (AFN) en proporciones del 25%, 50%, 75% y 100%. Las mezclas se diseñaron para alcanzar una resistencia a la compresión de 28 MPa, conforme a la metodología ACI 211. 1.[1]

La caracterización físico-mecánica de los agregados evidenció una absorción significativamente mayor en los AFR respecto al AFN: 1,36% (AFN), 9,61% (AFR-RCe), 9,19% (AFR-RCo) y 16,96% (AFR-RL). Esta variabilidad requirió ajustar el contenido de agua en las mezclas para conservar la trabajabilidad y propiedades en estado fresco.

Se implementó un diseño experimental orientado a optimizar la dosificación y proporción de AFR, mediante un modelo matemático que permite predecir y maximizar la resistencia a compresión en función del porcentaje de reemplazo, constituyéndose en una herramienta útil para el diseño de concretos sostenibles.

Para validar su aplicabilidad estructural, se fabricó una viga de concreto reforzado (4 barras longitudinales y estribos de 3/8") empleando AFR, la cual fue sometida a ensayos de flexión pura. Se utilizó el modelo de "Kent and Park" para concreto confinado en la generación del diagrama momento-curvatura, estimando un momento de agrietamiento de 38,08 kN y una carga última de 85,43 kN. Experimentalmente, la viga con AFR alcanzó una carga de agrietamiento de 39,12 kN y una carga última de 82,30 kN, superando el desempeño de la viga de referencia con AFN.

Palabras clave: residuos de construcción y demolición, agregado fino reciclado, agregado fino natural, mezcla de concreto, resistencia a la compresión.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de adoptar técnicas de construcción más sostenibles ha impulsado una revisión de los métodos tradicionales, especialmente en la producción de concreto[2]. En la actualidad, muchos investigadores han desarrollado una gran cantidad de estudios sobre el hormigón con agregados reciclados, pero la mayoría de estos estudios se centran en el agregado grueso reciclado (AGR) [3], [4], [5]. Por lo general, se tiende a ignorar el agregado fino reciclado (AFR) producido en la trituración y en el proceso de preparación de agregado grueso reciclado.

Con el objetivo de mejorar la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y reducir la explotación de recursos naturales, surge la necesidad de abordar el uso del AFR. En este contexto, cabe destacar que la extracción de arena, un recurso esencial en la construcción, a menudo se realiza de manera ilegal. Un estudio publicado en 2024 [6] reveló que, en Brasil, el 76% de la arena utilizada en la construcción se extrae de manera clandestina. Este fenómeno ha provocado la sobreexplotación de las arenas de los ríos, ya que el proceso de extracción es relativamente discreto y difícil de controlar, lo que dificulta la regulación estatal y reduce los riesgos para los operadores ilegales.

La extracción descontrolada de arena altera la morfología de los cauces fluviales, generando graves impactos en el ecosistema, como la deforestación y la pérdida de biodiversidad acuática. Además, estas prácticas afectan negativamente la piscicultura y comprometen la calidad de vida de las comunidades locales que dependen de estos recursos.

En Colombia, la Ley 2111 de 2021[7] modifica el Título XI de la Ley 599 de 2000 [8], referente a los "Delitos contra los recursos naturales y el medio ambiente". En su Artículo 332, aborda específicamente la "explotación ilícita de yacimiento minero y otros materiales". Este artículo “El que sin permiso de autoridad competente o con incumplimiento de la normatividad existente explote, explore o extraiga yacimiento minero, o explote arena, material pétreo o de arrastre de los causes y orillas de los ríos por medios capaces de causar graves daños a los recursos naturales o al medio ambiente, incurrirá en prisión de treinta y dos (32) a ciento cuarenta y cuatro (44) meses y una multa de ciento treinta y tres coma treinta y tres (133,33) a cincuenta mil (50000) salarios mínimos legales mensuales vigentes”,

A pesar de la existencia de esta normativa que penaliza la extracción ilegal de arena de ríos, su control sigue siendo un desafío debido a la creciente demanda del material y las dificultades para detectar estas prácticas clandestinas. Además, la falta de estadísticas confiables sobre la cantidad de arena extraída ilegalmente impide el diseño de políticas públicas efectivas para combatir esta problemática.

No obstante, algunos datos provistos por la Agencia Nacional de Minería ofrecen una perspectiva sobre la explotación legal de materiales de construcción [9]. En 2023, se pagaron regalías por 4.947.344 m^3 de arena en todo el país, de los cuales 133.245 m^3 correspondieron al Valle del Cauca. En esta región, Jamundí destacó como el municipio con mayor explotación, alcanzando 55.605 m^3, lo que representó casi el 40% del total en el

departamento. Este fenómeno se atribuye al crecimiento urbanístico en el sur de Cali y a la proximidad de las obras de construcción a este municipio. Por estas razones, investigar el uso de agregado fino reciclado como sustituto de la arena natural en la producción de concreto adquiere gran relevancia [10].

En Colombia, desde las pequeñas ciudades hasta las capitales como Bogotá, Medellín y Cali se ven afectadas por la gestión inadecuada de RCD [11]. Uno de los principales problemas generados es la acumulación excesiva de RCD que se debe principalmente a la baja tasa de reciclaje de este tipo de residuos porque no se conocen métodos de aprovechamiento, así como también hacen falta equipos para su procesamiento y reincorporación en la cadena productiva [12].

En respuesta a esta problemática, se han promulgado diversas resoluciones que reglamentan la gestión de residuos sólidos, estableciendo lineamientos para la gestión integral de los RCD generados en actividades de construcción y demolición. Estas normativas incluyen mecanismos para su gestión eficiente, aprovechamiento y disposición final [13].

Entre ellas están la Resolución 0472 de 2017 y la Resolución 1257 de 2021, esta última modifica algunos artículos de la 0472. Uno de los cambios más destacados es en las metas de aprovechamiento de RCD, donde se establece que para el año 2030 los grandes generadores deberán aprovechar efectivamente un porcentaje en peso del total de RCD generados en la obra así: 75% para obras en municipios de Categoría especial, 60% para obras en municipios de Categoría 1, 2 y 3; y 40% para obras en municipios de Categoría 4, 5 y 6 [14].

A pesar de la existencia de especificaciones técnicas como la NTC 6421 y NTC 6422, que establecen requisitos de calidad y directrices para el uso de AGR en concreto estructural y no estructural [15], [16], los AFR no tienen alcance en esta normativa debido a que las investigaciones y normativas consultadas no llegan a un consenso respecto a su uso y aplicación en el concreto hidráulico. Esta falta de consenso hace que la información sea ambigua y haya diferentes versiones sobre el uso de los AFR.

Sin embargo, estudios recientes han mostrado la viabilidad favoreciendo su utilización de los AFR en la producción de concreto. Por ejemplo, López-Yépez et al. 2020 [17], demostraron la viabilidad del desarrollo de resistencias en concretos utilizando reemplazos de 30% y 100% de AFR por AFN. Asimismo, Bedoya et al. 2015 [18] lograron un 98% de la resistencia de referencia con un 25% de reemplazo de AFR por AFN. Garg et al. 2023 [19] encontraron que un 50% de reemplazo de arena de río por AFR proporciona resistencias a la compresión comparables con los de referencia. Además, los investigadores sugieren el uso de aditivos superplastificantes debido a la alta porosidad de los AFR, los cuales requieren más agua para lograr una buena trabajabilidad.

En este contexto, es crucial estudiar la viabilidad del uso de AFR como reemplazo de la arena natural, empleando RCD como materia prima para la producción de estos agregados reciclados. Esto permitirá aumentar el porcentaje de aprovechamiento en obra y cumplir con las metas establecidas para 2030, ofreciendo una alternativa adicional para reincorporar los

RCD en la cadena productiva mediante la producción de AFR. Con este trabajo de investigación se buscó caracterizar y evaluar el uso de RCD en la producción de AFR para su incorporación en mezclas de concreto. Se diseñaron mezclas que cumplieran con las propiedades físicas y mecánicas necesarias para obtener un concreto estructural con una trabajabilidad adecuada y resistencias superiores a 28 MPa. Este enfoque permite explorar una alternativa sostenible para los RCD generados en las obras, analizando específicamente el comportamiento de las mezclas de concreto al incorporar AFR derivados de residuos provenientes de construcciones locales. Se pretende que la investigación pueda ser utilizada como base para empezar a constituir una norma colombiana en la cual se establezcan los lineamientos necesarios para el uso de AFR en mezclas de concreto.

2. PROBLEMA

2.1. Descripción

En la actualidad, la actividad humana en el sector de la construcción provoca diferentes impactos ambientales. El crecimiento de las zonas urbanas y la mayor demanda de infraestructura, como consecuencia del aumento de la población, son aspectos que afectan directamente el medio ambiente teniendo en cuenta que se necesitan recursos naturales para satisfacer estas necesidades.

En 2019, Programme des Nations Unies 2019 [20], menciona que el uso de agregados probablemente llegue a estar cerca de 50 mil millones de toneladas anuales para el año 2030 (para el año 2012 eran entre 25.900 millones a 29.600 millones), el sector de la construcción utiliza más del 50% de ese total, teniendo en cuenta que la población mundial en el año 2030 será de 8.600 millones de personas según datos de Naciones Unidas, se tendría un consumo per-cápita para este año de aproximadamente de 6 toneladas de agregados de los cuales la mitad serían utilizados por el sector de la construcción. Aunque estos materiales son los segundos recursos que más se extraen y comercializan después del agua, son uno de los menos regulados en muchas regiones.

Cada vez más, la arena se produce a través de prácticas extractivas perjudiciales para el medio ambiente en ecosistemas sensibles (terrestres, fluviales y oceánicos) [20]. Este aumento de toneladas anuales se puede evidenciar en la ciudad de Cali; el rio Cauca es uno de los ejemplos de explotación de materiales de arrastre que ha producido impactos negativos como aumento de dragas, mini dragas y malacates; así mismo, la inestabilidad de las obras existentes sobre el cauce del rio, como puentes, bocatomas y obras de control de inundaciones como lo es el Jarillón, que en caso de sufrir algún daño puede provocar pérdidas humanas, daños materiales y un problema medioambiental en la ciudad [21]. Según datos de ASOGRAVAS en Colombia la demanda de agregados pétreos en el 2023 fue aproximadamente 171 millones de toneladas teniendo un consumo per-cápita de aproximadamente 3,30 toneladas para el 2023 [21].

Actualmente no se puede evitar la ejecución de obras de construcción, remodelación y demolición debido al aumento constante de la población. Se debe buscar soluciones sostenibles aprovechando el uso de materiales reciclados, reutilizados y renovables; también diseños arquitectónicos que consideren utilizar energías alternativas. Se puede notar un beneficio ambiental para los ecosistemas urbanos al utilizar concretos fabricados a partir de la reutilización y el reciclaje de escombros, teniendo en cuenta que los residuos reutilizados no terminarían en vertederos y además se estaría evitando la extracción de materia prima de la naturaleza. [22] La gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) es un tema que ha venido ganando importancia en muchos países y los problemas relacionados con la gestión de este flujo de residuos han aumentado con el crecimiento y desarrollo de las grandes ciudades. [23] En el país hay edificaciones en las principales capitales que han implementado procesos constructivos alternativos con menores impactos al medio ambiente, así como también han incorporado materiales reciclados. Un ejemplo es Bogotá donde se encuentra el

Centro Empresarial Elemento, que cuenta con un sistema de reciclaje de aguas lluvias y grises, aparatos sanitarios de bajo consumo, bombillos eficientes, paneles solares en las cubiertas y materiales de construcción con contenidos reciclados. También se puede destacar el proyecto residencial Kubik Virrey I y II ubicado en el norte de Bogotá, que fue el primero de su tipo en obtener una certificación LEED Gold en la capital del país, entre sus cifras se destacan: 50% de reducción en el consumo de agua, 20% de insumos reciclados en los materiales utilizados en la construcción y 80% de aprovechamiento de los residuos generados en la construcción. [24]

La información de la cantidad de escombros que se producen en Colombia no ha sido actualizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. No obstante, un estudio realizado en el 2011 muestra que, entre las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés, se generaron más de 22 millones de toneladas de RCD. [25] En la ciudad de Cali se producen aproximadamente 2480 metros cúbicos de estos residuos por día, en un año esta cifra llega a un millón de metros cúbicos, situación que resulta preocupante porque ubica a la ciudad dentro de las 3 capitales colombiana que más generan escombros. [11] En promedio en Cali se producen 2 mil toneladas diarias de RCD, siendo superada por Medellín donde se producen al menos 6 mil toneladas diarias y más de 2 millones de toneladas al año, y Bogotá que genera cerca de 300 mil toneladas por día y aproximadamente 12 millones de toneladas al año. [25]

La gestión que ha sido ejecutada en Colombia es llevar estos residuos a un sitio de disposición final de los RCD, anteriormente conocido como escombrera. Sin embargo, la escasez de estos lugares en las ciudades colombianas tiene como consecuencia el vertimiento en sitios no autorizados, que resulta ser una opción más sencilla para desechar estos residuos, pero esta alternativa no ayuda a disminuir las preocupaciones ambientales mencionadas. Así mismo la falta de otras opciones de aprovechamiento que estén respaldadas técnicamente conlleva a una administración defectuosa de los RCD. Es fundamental cambiar la forma en que se ven los RCD, hay que dejar de considerarlos como desechos y empezar a verlos como materiales que pueden ser reutilizados y reciclados en nuevas construcciones [13]. Para esto, es necesario la implementación de un sistema de gestión integral que incluya la separación y clasificación de los materiales y su transporte a centros de acopio para que puedan ser procesados adecuadamente. Además, es importante cumplir con la normatividad y los procedimientos establecidos para el aprovechamiento de estos residuos en el sector de la construcción. [11]

El reciclaje de los RCD es una oportunidad de aprovechar estos recursos disponibles, para este propósito en Colombia ha emitido el Instituto de Normas Técnicas ICONTEC dos Normas para el uso de AGR la **NTC 6421** y la **NTC 6422,** pero es necesaria una norma que avale el uso de AFR, donde se establezcan los requisitos de calidad y orientaciones de uso para AFR para concreto estructural y no estructural, tales como análisis por tamizado, masa unitaria y vacíos, materia orgánica, densidad y absorción, humedad, y así maximizar el aprovechamiento de RCD, teniendo en cuenta que en la producción de AGR se genera una gran cantidad de finos (<4,75 mm) que al final terminan desechados y se podrían utilizar como AFR. Otro aspecto para resaltar de esta problemática es que estas normas avalan el

reciclaje de los RCo, pero limitan el contenido de los RCe y RL a valores por debajo del 30%. Es decir que, aquellos AGR considerados mixtos no se incluyen en la NTC 6421. Este aspecto justifica el desarrollo de estudios que promuevan el uso de los residuos de naturaleza cerámica (RCe y RL), los cuales cuando son sometidos a procesos de trituración generalmente derivan en AFR. Adicionalmente, el uso de AFR mixtos podría ser una solución en aquellos casos en donde los RCD no sean susceptibles de separación y/o clasificación por tipo de residuo (RCo, RCe y RL).

Por lo anterior, este trabajo de grado tiene como propósito el estudio del reemplazo de diferentes porcentajes de AFN por AFR, con el fin de determinar su efecto sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de mezclas de concreto, contribuyendo a al desarrollo de estudios que permitan cerrar la brecha de conocimiento sobre el uso de AFR en el ámbito local. Por su parte, los resultados obtenidos podrían ser considerados un punto de partida para el desarrollo de normativas técnicas que avalen el uso de la fracción fina de los RCD en la producción de agregados reciclados, como complemento a la ya existente NTC 6421.

2.2. Formulación

¿Qué porcentaje de sustitución de agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado (AFR), proveniente de los RCD, es posible utilizar en el diseño de una mezcla de concreto estructural sin afectar las propiedades en estado fresco y/o endurecido?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de agregados finos reciclados (AFR) provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de mezclas de concreto.

3.2. Objetivos Específicos

Caracterizar la fracción fina de los residuos de concreto (AFR-RCo), cerámica (AFR-RCe) y ladrillo (AFR-RL) para su uso como AFR.

Determinar el desempeño físico-mecánico de concretos con reemplazos del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del agregado fino natural (AFN) por AFR.

Implementar un diseño de experimentos (tipo diseño de mezclas) para la optimización de mezclas de concreto con AFR.

Validar el potencial de aplicación de los concretos con AFR en la producción de un elemento estructural.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Marco Teórico

El concreto es el material más utilizado del mundo, el cual está regularmente constituido por materiales como: cemento, agua, agregados gruesos y agregados finos; siendo estos últimos, materiales extraídos de canteras y cuencas de ríos, generando contaminación de las cuencas fluviales y erosionándolas, lo cual puede a posteriori generar problemas de inundaciones, fallas del suelo, perdida de banca, crecientes súbitas etc. Materiales alternativos que pueden emplearse como agregados gruesos y/o fino se pueden obtener a partir de RCD, que son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas. [26]

4.1.1. Agregados para concreto.

- Agregado grueso natural: Material proveniente de la descomposición de la roca de origen volcánico y que de acuerdo con su tamaño es retenido el 100% en el tamiz #4.
- Agregado fino natural: Material proveniente de la descomposición de la roca de origen volcánico y que de acuerdo con su tamaño pasa el 100% por el tamiz #4 es retenido el 100% en el tamiz #200.
- Agregado fino reciclado (AFR): Según la NTC 174 Se define "como un material granular que es derivado, separado o removido de una fuente de residuos sólidos y que es procesado para ser utilizado en la forma de materia prima o producto" [27].

4.1.2. Teoría de empaquetamiento y distribución ideal "Fuller Thompson".

Es un método que combina porcentajes de grava y arena obteniendo una curva granulométrica ideal para un diseño de mezcla; se usa cuando no se cumple la NTC 174; este se rige por la expresión matemática:

$$p = 100\sqrt{\frac{d}{D}}$$

p: porcentaje de material que pasa por el tamiz de abertura "d" de una masa de agregados cuyo tamaño máximo es D. [1]

4.1.3. Limites granulométricos de NTC 174.

"Establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos, (excepto los agregados livianos y pesados) para uso en concreto." [27].

Tabla 1. Limites granulométricos para un agregado fino. Fuente: NTC 174.

Tamiz NTC 32	Porcentaje que pasa (%)
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	10 a 30
150 µm	2 a 10

4.1.4. Efecto de los AFR en estado fresco.

Cuando se utiliza AFR, debido al gran contenido de poros se genera mayor absorción en comparación con el agregado natural, por lo cual es importante garantizar el asentamiento del concreto. Silva et al. 2018 [28] en su investigación evidencio que, al corregir el agua de diseño perdida por la absorción, después de 15 a 30 minutos los niveles de trabajabilidad son equivalentes para las mezclas con AFR y AFN. También, Jiménez et al. 2013 [29] obtuvo una disminución en la trabajabilidad usando un AFR proveniente de baldosas cerámicas de ladrillo rojo, el cual tenía una mayor capacidad de absorción. En conclusión, si se realiza una correcta corrección del agua de absorción del AFR, no existen grandes diferencias con una mezcla de control en función de la mezcla en estado fresco.

En la investigación desarrollada por Khatib 2005 [30] sobre las propiedades del concreto que contiene AFR de concreto triturado (CC) y ladrillo triturado (CB), estableció que, con una relación agua-cemento de 0,5 todos los concretos presentan de buena a muy buena trabajabilidad sin el uso de aditivos. El asentamiento varió de 170 mm a 190 mm para el concreto que contiene CC y de 85 mm a 155 mm para el que contiene CB. Hubo un aumento sistemático del asentamiento a medida que aumentaba el contenido de CC en la mezcla, mientras que se observó una disminución del asentamiento con el aumento de contenido de CB.

4.1.5. Efecto de los AFR en las propiedades físicas y mecánicas (estado endurecido).

La resistencia a la compresión es una propiedad del estado endurecido, la cual representa la capacidad del concreto de resistir una fuerza por unidad de área. Para Khatib 2005 [30] esta propiedad tiene una disminución en mezclas con reemplazos de AFN por AFR-RCo. En efecto, las mezclas con reemplazos de 100% y 25% presentaron una reducción de la resistencia a la compresión del 30% y 15%, respectivamente. Para el AFR-RL se hizo un reemplazo de 50%, el cual no presentó una reducción significativa de la resistencia a la compresión. Con un reemplazo del 100% se alcanzó una reducción del 10% de la resistencia. La naturaleza porosa de los AFR genera un efecto en el estado endurecido del concreto, ya que el concreto presenta un aumento en sus vacíos por la porosidad del agregado que lo

conforma, también se presenta una disminución de densidad respecto a la muestra de control sin reemplazo de agregado, de la misma manera la absorción de agua del concreto aumenta; todo esto conlleva una reducción en la resistencia del concreto a medida que aumenta el reemplazo del AFN por AFR [31].

4.1.6. Efecto de los AFR en la durabilidad del concreto.

La durabilidad del concreto se puede ver afectada por diferentes factores como por ejemplo la carbonatación. Para Jamil et al. 2023 [32] la perdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono reacciona con la humedad que conserva el concreto y forma acido carbónico, tiene mayor significancia cuando el agregado tiene mayor porosidad, para esta investigación la mezcla de concreto con AFR que poseía mayor cantidad de poros, la cual era de mortero viejo, fue la mayor afectada en su durabilidad. Otros análisis para evaluar los efectos de los AFR en la durabilidad del concreto muestran como la masa y la resistencia del concreto, disminuyen con la exposición del concreto en soluciones diluidas de ácido clorhídrico y sulfúrico. Garg et al. 2023 [19] en su análisis de durabilidad del mortero con AFR-RCo, evidenció que los cubos de mortero expuestos 180 días a soluciones de ácido clorhídrico y sulfúrico, presentaron una reducción de masa de casi el doble respecto a los cubos de mortero sin reemplazo de AFR, de la misma forma hubo una reducción de hasta 20% en la resistencia a la compresión como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, p ara los cubos expuestos a H_2SO_4 con un reemplazo del 50% de AFN por AFR-RCo; para los cubos expuestos a HCl con un reemplazo del 50% de AFN por AFR-RCo, se reportó una disminución muy marcada de la resistencia a la compresión de hasta el 50%.

Para Kirthika et al. 2020 [33] el porcentaje de pérdida de masa a los 90 días de las mezclas de concreto después de ser sumergidas en soluciones de H_2SO_4 y de HCL, iba en aumento con los días de inmersión y con el porcentaje de reemplazo por AFR. En efecto, la pérdida de masa para 30% de reemplazo fue 18,75% y 16,25% cuando los concretos fueron expuestos a H_2SO_4 y HCL, respectivamente. Para un 100% de reemplazo fue de 28,9% y 23,3%, respectivamente. La reducción de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el tiempo y el reemplazo de AFN por AFR-RCo, fue más pronunciada para un reemplazo del 100% respecto a la mezcla de control.

4.2. Antecedentes

Se realizó un análisis bibliométrico basado en los resultados de una búsqueda en la base de datos Scopus de Elsevier usando como KEYWORDS “concrete AND using AND recycled AND fine AND aggregate”; en el cual se analizó el comportamiento de la producción científica a nivel mundial relacionada con mezclas de concreto y AFR. Se utilizó el software libre VOSviewer, que es un programa para construir y visualizar redes bibliométricas, con el fin de obtener un panorama global sobre el tema, de aquí se exportó un archivo en formato RIS para obtener un mapeo de coocurrencias de las palabras clave como se observa en la Figura 1, donde podemos identificar una coocurrencia de mínimo 41 palabras claves. Con esto podemos identificar cual es la temática de investigación acerca de los concretos con

AFR. Las temáticas de investigación que más densidad tiene en la nube son: 1) reciclaje, 2) resistencia a la compresión, 3) agregados de concreto, y 4) agregados reciclados.

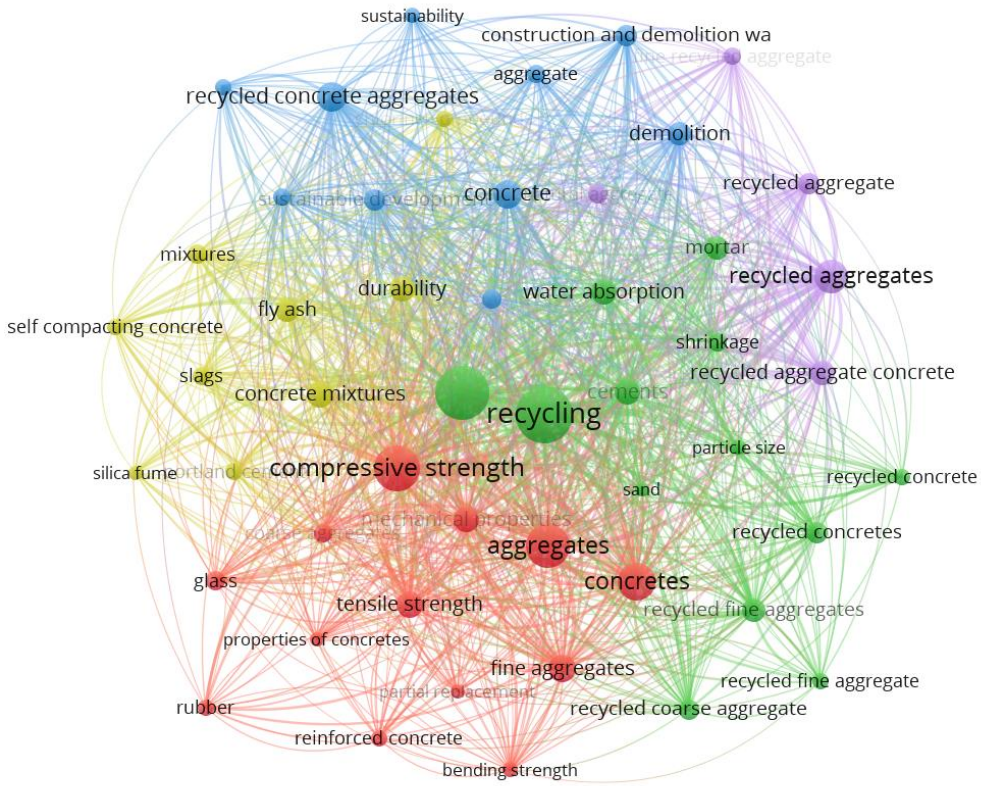


Figura 1. Redes Bibliométricas. Fuente: propia.

Se analiza que en el transcurso de los años el tema ha tenido un crecimiento exponencial que se puede ver en la Figura 2, especialmente a partir del año 2008. Para el año 1998 sólo eran 6 documentos que se podían encontrar del tema y para el año 2024 la cifra era de 421 documentos, hasta el 24 de Enero del año 2025 día en que se realizó la búsqueda, se pueden encontrar 2938 documentos. En la Figura 3 se observa que actualmente China reporta la mayor cantidad de publicaciones (657), luego se encuentra India con 460 publicaciones, en tercer lugar, se encuentra Estados Unidos con 184 publicaciones. En Suramérica, el país con más publicaciones es Brasil (71), seguida por Colombia con un total de 24 publicaciones, lo cual indica que a nivel global los países de Suramérica no se destacan lo suficiente.

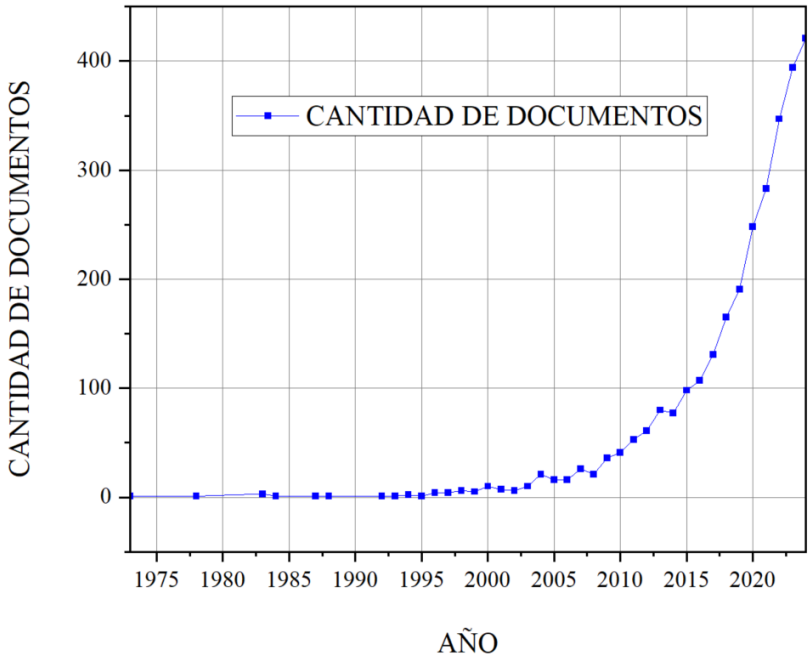


Figura 2. Cantidad de documentos publicados VS año. Fuente: propia.

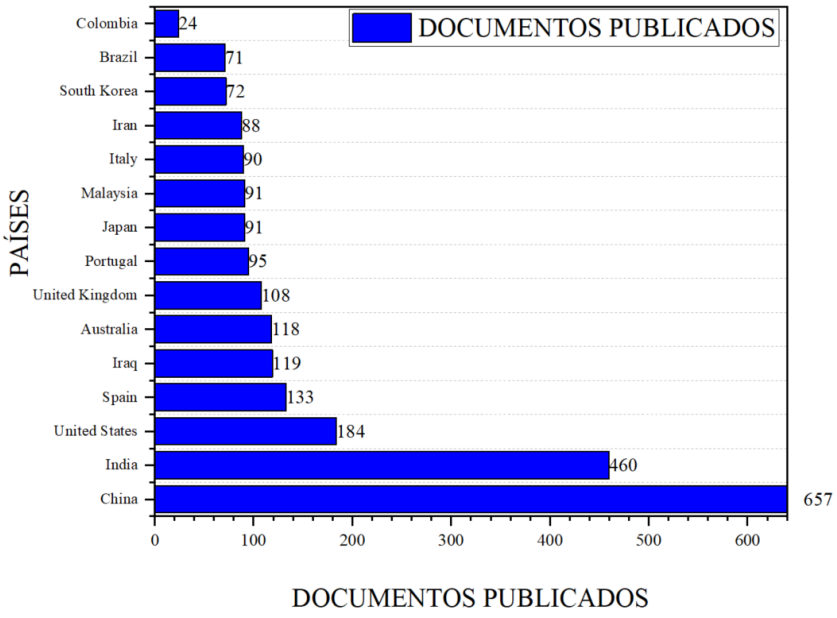


Figura 3. País VS Cantidad de documentos publicados. Fuente: propia.

Del análisis de la producción científica a lo largo del tiempo y su distribución por países, se seleccionaron los documentos de mayor relevancia para el presente estudio, los cuales son:

En el 2020, López L. et al. [17], presentaron en su estudio “Factibilidad del remplazo de agregados finos reciclados de demolición en las propiedades físicas de concreto estructural” el efecto en las propiedades mecánicas y de durabilidad del reemplazo de 30%, 50%, 75% y 100% de AFN por AFR proveniente de plantas de demolición. Para el control del reemplazo

del AFR se aplicó una nueva metodología recomendada por la ASTM C 33-18, la cual se basa en la división de la curva granulometría en tres zonas (arena fina, arena media y arena gruesa). Para el diseño de la mezcla se utilizó el procedimiento Road Note Laboratory (RNL) debido a que los agregados no cumplían con lo descrito en las especificaciones de la norma ASTM C33; dicho procedimiento consiste en la determinación de manera gráfica de porcentajes de agregados finos y gruesos en la mezcla de concreto. En cuanto los resultados a compresión, el reemplazo óptimo de AFR fue del 30%, ya que sólo redujo en un 6,1% la resistencia a compresión del concreto patrón, mientras que en altos porcentajes (75% y 100%) se redujo la resistencia en un 18% para ambas mezclas. Por otro lado, para el ensayo de durabilidad se realizó la prueba de migración de cloruros acorde a normativa ASTM C1202, en la cual se observó un incremento del coeficiente de migración de cloruros a medida que aumenta el reemplazo del AFR, debido a la alta porosidad de estos concretos, por lo cual los investigadores recomiendan no utilizar más del 30% de reemplazo o incluir materiales cementicios suplementarios con el fin de suplir esta deficiencia.

En el 2015, Bedoya et al [18], en su estudio "El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana" muestran como el concreto reciclado puede ser usado en proyectos de urbanismo que generen un resultado beneficioso no sólo a la sociedad sino también al medio ambiente. Para la obtención del AFR seleccionaron una mezcla de 50% hormigón y 50% mampostería de ladrillo cerámico; para AGR utilizaron residuos de concreto 100%. Para las mezclas se utilizaron 4 diferentes diseños, los cuales corresponden a 0%, 25%, 50%, 100% del total de agregados gruesos y de finos reciclados vs el total de agregados naturales. El reemplazo del 25% permitió obtener resultados similares a los de la mezcla de referencia, mientras con el reemplazo del 50% la resistencia a la compresión alcanzó un 95% de la del concreto de referencia. Los resultados que obtuvieron en cuanto a porosidad y absorción fueron consecuentes con lo dado por diferentes investigadores como D. K. Nekrasov. [34]. En cuanto a la carbonatación los resultados obtenidos también fueron óptimos, ya que para la mezcla de 50% de reemplazo se obtuvo una profundidad de carbonatación de 12,4 mm en un tiempo de exposición de 27,4 años, el cual es aceptable ya que para la norma colombiana el recubrimiento mínimo es 50 mm. Tomando en cuenta que las propiedades de durabilidad (absorción, porosidad, carbonatación, entre otras) no mostraron una afectación importante, los autores sugieren la posibilidad de emplear este tipo de mezclas en estructuras convencionales cuyos concretos exijan resistencias a la compresión de 21 MPa a 35 MPa.

En 2016, Sosa et al [35], en su estudio "Composición y propiedades del agregado fino reciclado en función del tamaño de partícula" utilizaron AFR proveniente de la trituración de un concreto de resistencia media de 35 MPa, el cual fue separado en los tamices #8, #16, #30, #50, #100. De los resultados se obtuvo que la densidad resultó similar para los diferentes tamaños de partículas, pero la absorción si aumentó al disminuir el tamaño de la partícula. Los autores destacan que, dada la incertidumbre en la determinación del estado saturado a superficie seca de los agregados de trituración por el método del cono, estos resultados no pueden considerarse definitivos.

En el 2015, Mattey Centeno et al [36] en su estudio “Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de ferrocemento con agregado fino reciclado” realizaron paneles de ferrocemento con AFR partiendo de una mezcla base mortero, con la resistencia mínima requerida para esta aplicación, 25 MPa a los 28 días de curado. Utilizaron un contenido de 400 kg/m^3 de cementante, una relación de agua/cemento de 0,38 y niveles de sustitución de AFN por AFR de 0%, 25%, 50%, 75%, 100%. La sustitución de AFN por AFR en la fabricación de morteros aumento la resistencia a la compresión en 7,3%, aun cuando los niveles de sustitución fueron altos, teniendo valores de resistencia de hasta 47,1 MPa a los 28 días, superando los 25 MPa ya definidos anteriormente. A partir de estos resultados se avanzó en la fabricación de paneles de ferrocemento con una resistencia a la flexión de 34,16 MPa, dando así resultados considerablemente buenos con la posibilidad de sustituir hasta un 100% de AFN.

Puente de Andrade et al. 2020 [37] analizaron la posibilidad de utilizar el Modelo de Empaque Compresivo (MEC) para mezclas de concreto que tienen AFR-RCo. Para este estudio, se produjeron concretos normales y de alta resistencia con dos tipos diferentes de AFR-RCo: un agregado producido en laboratorio denominado “Residuos LAB”, obtenidos mediante el proceso de trituración de muestras de concreto de 30 MPa, simulando el uso de residuos de concreto con propiedades controladas y sin contaminación; y el segundo proveniente de residuos de concreto obtenidos de una empresa de reciclaje de hormigón ubicada en Sao Paulo, Brasil, denominados “Residuos D”. La dosificación de la mezcla se llevó a cabo mediante la implementación de los conceptos del MEC desarrollado por De Larrard, en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, París), y se basa en una teoría que describe la densidad de empaquetamiento para todos los componentes utilizados en la mezcla de concreto. La prueba de densidad de empaquetamiento se realizó considerando las clases de material “mono-size”, las cuales fueron: Clase 1 (4,75 mm > d > 2,36 mm), Clase 2 (2,36 mm > d > 1,18 mm) y Clase 3 (1,18 mm > d > 0 mm) para arena natural y reciclada; y Clase 1 (9,75 mm > d > 7,93 mm), Clase 2 (7,93 mm > d > 6,30 mm) y Clase 3 (6,30 mm > d > 4,75 mm) para agregados gruesos naturales.

Para la aplicación del MEC, se utilizó el software Betonlab Pro-3, el cual permite insertar datos relativos a las propiedades de los componentes del concreto, y con estos datos optimiza las mezclas de acuerdo con lo que se necesita obtener. Se utilizó para producir mezclas de 30 MPa y mezclas de 60 MPa, para cada uno de los AFR estudiados y tres porcentajes de reemplazo (0%, 25% y 50%). Para utilizar el MEC es necesario tener algunas consideraciones relacionadas con la capacidad de absorción de agua, teniendo en cuenta que es mucho mayor en comparación con los agregados naturales, como lo afirma Amario et al. 2017 [38] en su investigación sobre agregado grueso de concreto reciclado (AGCR). Esta absorción es aún mayor cuando se trata de AFR-RCo debido a la cantidad de partículas de arena que son simplemente pasta, lo que aumenta considerablemente la porosidad del material. El valor de absorción para AFR-RCo-D (6,9%) es mayor que AFR-RCo-LAB (4,4%) y la cantidad de pasta adherida es menor para AFR-RCo-D (24,4%) en comparación con AFR-RCo-LAB (32,8%). En el MEC, los agregados se utilizan en condiciones secas durante el proceso de mezcla, y para saturarlos se debe utilizar la capacidad de absorción de agua de 24 horas. Sin

embargo, cuando se utiliza material con alta absorción de agua en la mezcla, este no es capaz de absorber la cantidad de agua equivalente a su propia absorción durante el tiempo de mezclado, por lo tanto, hay un aumento en la relación efectiva agua-cemento debido al agua adicional libre en el sistema. En consecuencia, este aumento puede afectar significativamente algunas propiedades del concreto, como la trabajabilidad, el calor de hidratación y las propiedades en estado endurecido, de modo que el agua que se debe agregar en la mezcla se determina en función de la cantidad que el AFR-RCo es capaz de absorber durante el tiempo de mezclado. Algunas investigaciones como la de Pepe et al. 2016 [39] [40], proponen medidas preliminares relacionadas con la absorción, tales como: la evolución temporal de la capacidad de absorción de agua. Estos métodos permiten determinar el procedimiento óptimo para la saturación de AFR durante el mezclado, sin afectar la relación efectiva agua/cemento.

En Colombia, las investigaciones relacionadas sobre el uso de AFR en mezclas de concreto son escasas en comparación con otros países; esta deficiencia puede también demostrar la falta de una norma técnica que avale el uso de los AFR como sustituto parcial o total del AFN. Por lo cual se espera que este trabajo de grado sea un aporte para la comunidad investigativa, permitiendo avalar el uso de los AFR en mezclas de concreto y su aplicación para la producción de elementos estructurales.

5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo de grado se ejecutaron las siguientes etapas debidamente formuladas, las cuales se representan en el siguiente diagrama de flujo (ver Figura 4).

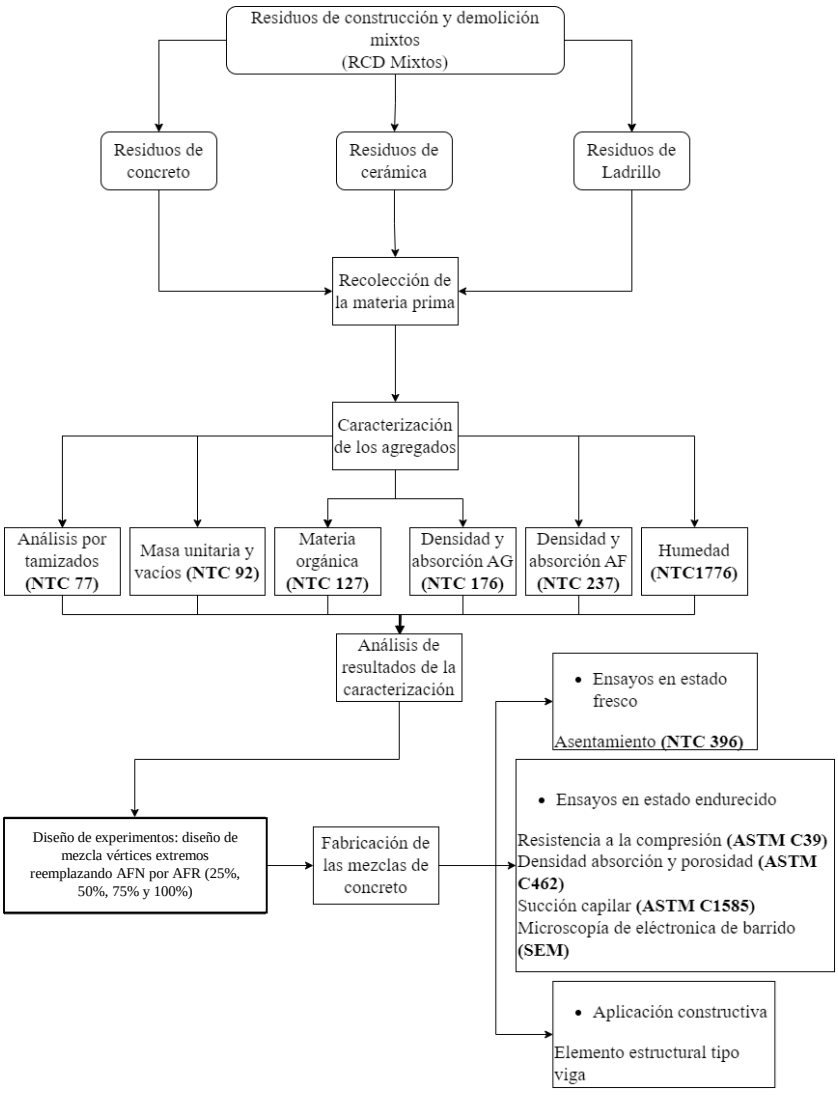


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: propia.

Seguidamente se describe cada una de las etapas de forma más detallada:

5.1. Caracterización de las materias primas

5.1.1. Recolección y adecuación de las materias primas

Se seleccionó como cementante cemento San Marcos tipo UG, en cuanto al agregado fino se recolectaron diferentes tipos de materiales reciclados de RCD tales como RCe, RCo y RL tomados de distintas obras, estos materiales fueron triturados y molidos hasta obtener dos distintas arenas de cada material. Para el agregado grueso (AGN) se utilizó grava natural y

se utilizó aditivo reductor de agua Sikaplast®-5500. En la Figura 5 se pueden apreciar fotografías de las materias primas utilizadas



Figura 5. Esquema de las materias primas utilizadas

5.1.2. Caracterización de las materias primas

La composición química del cemento fue determinada mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) en un espectrómetro ARL™ PERFORM'X Sequential. La densidad se determinó utilizando el Frasco LeChatelier y el tamaño promedio de partícula se determinó mediante la técnica de granulometría láser utilizando un equipo Mastersizer 2000.

Los RCD triturados obtenidos anteriormente y el AGN, fueron caracterizados a partir de los siguientes ensayos: análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (NTC 77), determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC 92), contenido de materia orgánica del agregado fino (NTC 127), densidad y absorción del agregado grueso (NTC 176), densidad y absorción del agregado fino (NTC 237), humedad de los agregados (NTC 1776).

5.2. Diseño y fabricación de las mezclas de concreto

El diseño de mezcla se realizó con base en la norma ACI 211.1. Para la mezcla de referencia (C-Ref) se eligió una resistencia a la compresión especificada de 28 MPa a los 28 días, utilizando un factor de seguridad de 8,5 MPa para una resistencia a la compresión media requerida de 36,5 MPa. Se estableció un asentamiento entre 75 mm y 100 mm y una relación A/C de 0,45. El proporcionamiento entre el agregado grueso y el agregado fino se determinó a partir del principio de gradación ideal propuesto por Fuller y Thompson.

5.2.1. Diseño de experimentos

Para analizar los datos de la variable de respuesta, en este caso la resistencia a la compresión, se realizó un diseño de experimentos con el objetivo de optimizar la mezcla de agregado

grueso y agregado fino. Para los diseños de concreto, se combinaron AFN, AFR y AGN en diversas proporciones, sumando un total de (63%) para $1m^3$ de concreto como se muestra en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 ; el resto de los materiales de la mezcla para preparación del concreto permaneció constante (37%).

Tabla 2. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RCe.

% de reemplazo	Nomenclatura	AFN (%)	AFR (%)	AGN (%)	Total (%)
0	C-Ref	34,00	0,00	29	63
25	C-25%-RCe	24,75	8,25	30	63
50	C-50%-RCe	16,50	16,50	30	63
75	C-75%-RCe	9,00	27,00	27	63
100	C-100%-RCe	0,00	39,00	24	63

Tabla 3. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RCo.

% de reemplazo	Nomenclatura	AFN (%)	AFR (%)	AGN (%)	Total (%)
0	C-Ref	34,00	0	29	63
25	C-25%-RCo	27,75	9,25	26	63
50	C-50%-RCo	18,50	18,50	26	63
75	C-75%-RCo	9,75	29,25	24	63
100	C-100%-RCo	0,00	34,00	29	63

Tabla 4. Porcentajes de agregados por metro cubico de concreto con RL.

% de reemplazo	Nomenclatura	AFN (%)	AFR (%)	AGN (%)	Total (%)
0	C-Ref	34,00	0,00	29	63
25	C-25%-RL	24,00	8,00	31	63
50	C-50%-RL	17,00	17,00	29	63
75	C-75%-RL	8,75	26,25	28	63
100	C-100%-RL	0,00	38,00	25	63

Dado que las proporciones de las componentes de la mezcla, AFR y AFN, están limitadas a valores entre el 0% y el 39%, y el contenido de AGN varía entre el 24% y el 31%, como se muestra en las Tablas 2, 3 y 4, se estableció un diseño de mezclas utilizando el método de vértices extremos para trabajar dentro de estos rangos definidos.

La mezcla con 100% AFN, es decir 0% de AFR, corresponde a la mezcla referencia C-Ref Usando el software Minitab 17 se construyó el diseño experimental, y se obtuvieron un total de 7 mezclas para cada sistema, las cuales se muestran en la Tabla 5, donde el punto central se repite 3 veces.

Tabla 5. Descripción del diseño de mezclas vértices extremos.

Aleatorización	Tipo Punto	AFR	AFN	AGN
7	Central	0,185	0,185	0,26
5	Axial	0,2925	0,0975	0,24
9	Central	0,185	0,185	0,26
1	Factorial	0	0,34	0,29
3	Central	0,185	0,185	0,26
2	Factorial	0,34	0	0,29
4	Axial	0,0925	0,2775	0,26

5.2.2. Modelo del experimento

El modelo planteado que permitió optimizar el porcentaje de reemplazo de AFN por AFR y AGN se presenta en la ecuación 1, donde $\hat{Y}$ es la resistencia a compresión, X_1 es el % de volumen de AFR, X_2 es el % de volumen de AFN, X_3 es el % de volumen de AGN, las combinaciones X_{ij} son las interacciones, los β_s son los coeficientes en el modelo y ε es el error aleatorio Cornell J.A 2022 [41].

El modelo que describe inicialmente este tipo de experimento es:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_3 X_3 + \hat{\beta}_4 X_1 X_2 + \hat{\beta}_5 X_1 X_3 + \hat{\beta}_6 X_2 X_3 + \hat{\varepsilon} \qquad \text{Ecuación 1}$$

En el análisis de varianza (ANOVA), se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis de falta de ajuste. Ho: La falta de ajuste no es significativa

  Ha: El falte de ajuste es significativa

- Hipótesis de no linealidad. Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ Ha: $\beta i \neq 0 \ \forall i = 1, 2, 3.$
- Hipótesis de efecto interacción. Ho: $\beta_4 = \ldots = \beta_6 = 0$ Ha: $\beta ii \neq 0 \ \forall i = 4, \ldots 6$

El modelo debe de cumplir con los supuestos sobre el error del modelo (normalidad, homogeneidad e independencia).

Optimización de la Variable de Respuesta:

La optimización de una o más variables de respuesta en el diseño de mezclas a través de la metodología de superficie de respuesta nos permite optimizar simultáneamente varias variables. Esto se logra mediante la función de conveniencia, que básicamente consiste en estandarizar las funciones para que todas estén en una escala común de 0 a 1. Luego, estas funciones se combinan utilizando la media geométrica y se optimiza la media métrica general (según la Ecuación 2) Max Kuhn. 2012 [42].

$$D = \left(\prod_{r=1}^{R} dr \right)^{1/R}$$

Ecuación 2

En el proceso de optimización de la respuesta, la predictibilidad o función de utilidad se emplea para evaluar en qué medida la solución ha cumplido con los objetivos conjuntos de todas las respuestas. Cuando se trata de maximizar la variable de respuesta, el método se desarrolla de la siguiente manera: se calcula la utilidad individual (di) para cada respuesta (Ecuación 3); luego, se combinan estas utilidades individuales para obtener la utilidad conjunta o compuesta (D). Y si sólo tiene una respuesta, la conveniencia general es igual a la conveniencia individual.

$$\mathrm{di}(y_i) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad \hat{y}_i(x) < \text{Limite inferior de la i - esima respuesta} \\ \left(\dfrac{\mathrm{Yi}(x) - \text{Limite inferior}}{\text{valor objetivo} - \text{limite inferior}} \right)^{S} & \text{si} \quad \text{Limite inferior} \le \hat{y}_i(x) \le \text{valor objetivo} \\ 1 & \text{si} \quad \hat{y}_i(x) > \text{valor objetivo} \end{cases}$$

Ecuación 3

Cuando se trata de maximizar una variable de respuesta es necesario determinar un valor objetivo y un valor de respuesta mínimo permitido. La conveniencia de que la respuesta este por encima del valor objetivo es 1, por debajo del valor mínimo aceptable de la conveniencia es 0. Cuanto más cerca esté la respuesta de la meta, más cerca está la conveniencia a 1.

Para el caso de esta investigación, la variable de respuesta fue la resistencia a la compresión a los 28 días de curado. Los cálculos para la optimización del modelo se realizaron en el paquete estadístico Minitab 19.

5.3. Determinación de las propiedades del concreto

5.3.1. Ensayo En Estado Fresco

- Se realizó el ensayo de asentamiento con base en la norma NTC 396 con el fin de que todas las mezclas estén en el mismo rango de trabajabilidad.

5.3.2. Ensayos En Estado Endurecido

Se realizó los siguientes ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas:

- El ensayo de resistencia a la compresión de acuerdo con la normativa ASTM C39 a los 7, 14 y 28 días de curado, utilizando especímenes cilíndricos de 7,5 cm X 15 cm (diámetro x altura).
- El ensayo de densidad absorción y porosidad del concreto siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C642 a los 28 días de curado, utilizando especímenes cilíndricos de 7,5 cm X 7,5 cm (diámetro x altura).

- Succión capilar, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C1585 a los 28 días de curado.
- También se observará la distribución de los componentes de la mezcla utilizando cámara microscópica del smartphone Realme GT 2 PRO y por microscopia electrónica de barrido (SEM), empleando un microscopio JEOL JSM-6490LV con un voltaje de aceleración de 20 kV.

5.4. Aplicación constructiva

Se validó el uso de la mezcla considerada optima en las etapas anteriores en la fabricación de un elemento estructural, para lo cual se elaboró una viga reforzada con acero longitudinal y transversal para ser sometida a flexión hasta llegar a la falla. Adicionalmente se evaluó la trabajabilidad del concreto al ser vertido en el encofrado de la viga y observar su flujo en los espacios entre estribos. También se realizó un análisis con base a los resultados obtenidos en la gráfica carga-deflexión, teniendo en cuenta principalmente la carga de agrietamiento y carga última registradas por la máquina universal. Adicionalmente, se realizó una viga patrón como referencia la cual contiene 100% AFN en el diseño de la mezcla de concreto y así poder comparar el desempeño de las vigas.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización de la materia prima

En la Tabla 6 se presenta la composición química del cemento San Marcos, la densidad del cemento fue 3,09 g/cm3 y el tamaño promedio de partícula 12,43 µm.

Tabla 6. Composición química por FRX del OPC.

Material	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Lol
OPC	25,23	6,80	55,7	2,85	2,74	0,07	0,26	4,60	11,69

En la Figura 6 se presenta la distribución granulométrica del agregado grueso natural (AGN), se aprecia que está dentro del rango de la ASTM C-33. Mientras que en la Figura 7 se representa la distribución granulométrica de los agregados finos, tanto el natural (AFN) como los reciclados (AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL) y los limites granulométricos establecidos para agregado fino por la norma ASTM C33. Es importante destacar que, para cada tipo de AFR, se identifican dos variantes de arena que se diferencian por su distribución granulométrica: una de mayor tamaño de grano y otra más fina. Ninguno de los AFR cumple con los límites de granulometría establecidos en la norma ASTM C33. Por ello, las diferencias en su distribución granulométrica hacen necesario combinar las arenas recicladas del mismo material.

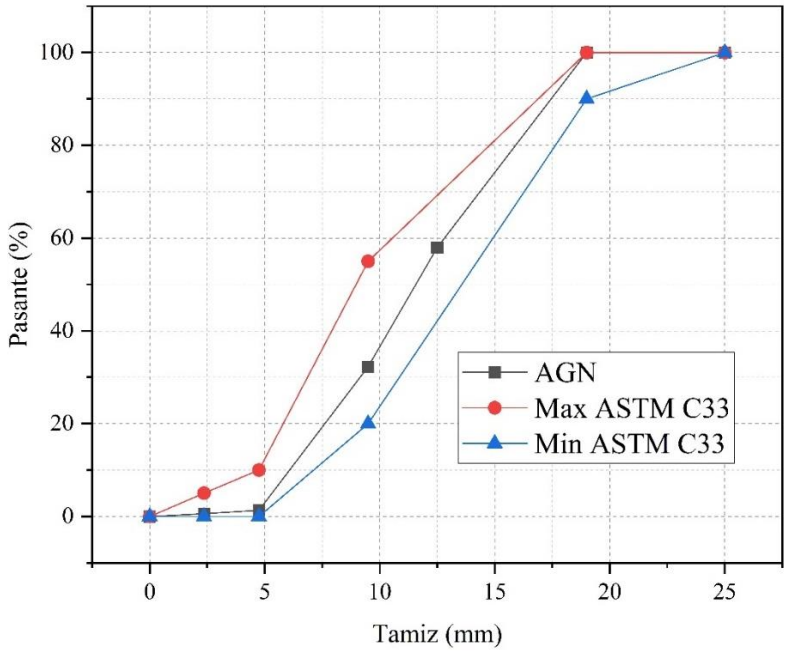


Figura 6. Curva de distribución granulométrica del Agregado Grueso.

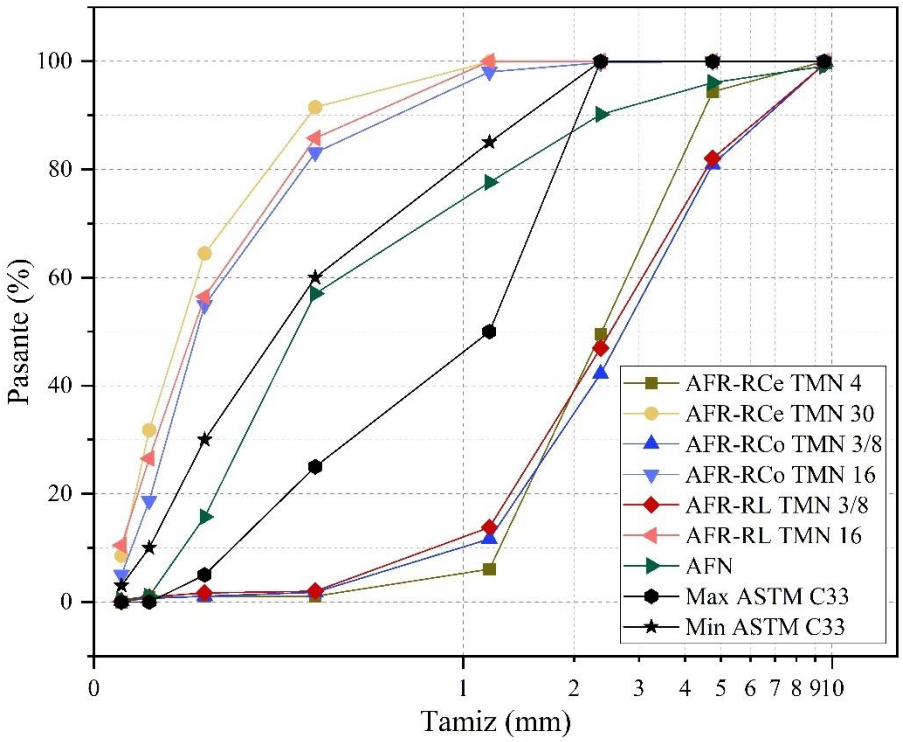


Figura 7. Curva de distribución granulométrica de los Agregados Finos.

En la Tabla 7 las arenas recicladas con partículas de mayor tamaño presentan un módulo de finura elevado, lo cual puede no ser adecuado para su uso en el diseño de mezclas de concreto, según la norma NTC 174, que especifica que los módulos de finura no deben ser menores de 2,3 ni mayores de 3,1. Un módulo de finura alto puede influir negativamente en la trabajabilidad y la cohesión de la mezcla. Por otro lado, las arenas recicladas con partículas de menor tamaño tienen un módulo de finura bajo, lo que también resulta inapropiado para el diseño de mezcla de concreto, ya que puede afectar la densidad y la resistencia del concreto. Para asegurar un rendimiento óptimo del concreto, fue esencial combinar las arenas recicladas del mismo material para que el módulo de finura de las arenas combinadas (Ver Tabla 8) esté dentro del rango adecuado, tal que permita una mejor distribución granulométrica, para poder ser empleadas en las mezclas de concreto y tener curvas óptimas de acuerdo con la metodología de gradación ideal propuesta por Fuller y Thompson [1].

Tabla 7. Módulo de finura agregados finos.

Agregado	Módulo de finura
AFN	2,63
AFR-RCe TMN 4	4,07
AFR-RCe TMN 30	1,33
AFR-RCo TMN 3/8	4,02
AFR-RCo TMN 16	1,23
AFR-RL TMN 3/8	4,34
AFR-RL TMN 16	1,12

Tabla 8. Módulo de finura de los AFR combinados utilizados en las mezclas de concreto.

Mezcla	Combinación AFR	Modulo de Finura
C-25%-RCe	50% RCe TMN 4 + 50% RCe TMN 30	2,73
C-50%-RCe	50% RCe TMN 4 + 50% RCe TMN 30	2,73
C-75%-RCe	60% RCe TMN 4 + 40% RCe TMN 30	3,06
C-100%-RCe	60% RCe TMN 4 + 40% RCe TMN 30	3,06
C-25%-RCo	60% RCo TMN 3/8 + 40% RCo TMN 16	2,97
C-50%-RCo	60% RCo TMN 3/8 + 40% RCo TMN 16	2,97
C-75%-RCo	60% RCo TMN 3/8 + 40% RCo TMN 16	2,97
C-100%-RCo	43% RCo TMN 3/8 + 57% RCo TMN 16	2,51
C-25%-RL	70% RL TMN 4 + 30% RL TMN 30	3,08
C-50%-RL	60% RL TMN 4 + 40% RL TMN 30	2,90
C-75%-RL	60% RL TMN 4 + 40% RL TMN 30	2,90
C-100%-RL	60% RL TMN 4 + 40% RL TMN 30	2,90

En la Tabla 9 se incluyen las propiedades físicas de los agregados. Se observa que los AFR presentan una mayor absorción de agua estando sus valores entre 9,19% y 16,96% en comparación con el AFN que es de 1,36%. Esta mayor absorción se debe a su superficie más rugosa y porosa, resultado del proceso de trituración al que son sometidos durante su obtención. Al respecto, Evangelista et al. 2010 [43] también reportaron una alta absorción de 13,1% en el AFR-RCo. Como consecuencia, las cantidades de agua requeridas en el diseño de mezcla aumentan a medida que se incrementa el reemplazo de AFR por AFN. En la presente investigación fue importante, al preparar la mezcla, saturar previamente los AFR para permitir que absorban el agua añadida y así alcanzaran la condición de saturado superficialmente seco (SSS). Este paso evita que el agua destinada al mezclado sea absorbida por los AFR, lo cual podría comprometer la fluidez y trabajabilidad esperada de las mezclas.

Es importante tener en cuenta que se utilizó la misma absorción para los RCD del mismo tipo, ya que para los AFR de menor tamaño había una gran incertidumbre en los resultados obtenidos siguiendo el método de la norma NTC 237, esto debido a su bajo tamaño de partícula. Según M. E. Sosa et al. 2023 [44], los métodos para la determinación de la absorción denominados “eléctrico” y el de “secado continuo” son los más apropiados para determinar la absorción en aquellos casos en el que las características del agregado permiten

cuestionar la pertinencia de la NTC 237 [45], también conocida como el método del cono. Con relación a lo anterior, se optó por asumir que la absorción de todo el AFR corresponde al valor determinado para la fracción de mayor tamaño, ya que los resultados eran más consistentes.

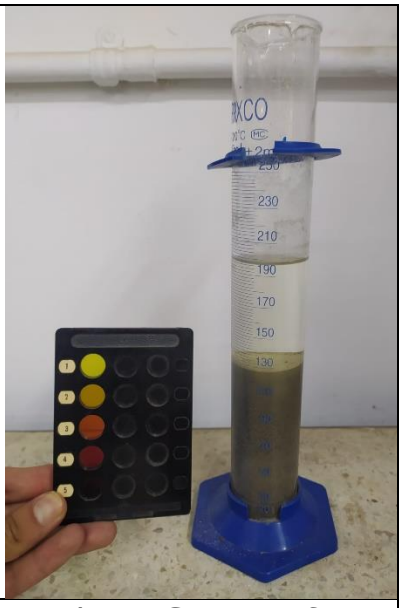
Se evidencia que la densidad y masa unitaria suelta y compacta de los AFR es menor que el AFN, esto es debido al proceso de reciclaje y trituración de los AFR que genera partículas con mayor cantidad de poros internos y externos [46]. Esto aumenta la porosidad global del agregado reciclado, reduciendo su densidad. Los AFR tienden a tener superficies más rugosas y formas más angulares debido al proceso de trituración. Estas características limitan el empaque eficiente de las partículas, lo que reduce la masa unitaria, tanto en estado suelto como compactado.

Tabla 9. Propiedades físicas de los agregados

Agregado	Densidad aparente (kg/m^3)	Absorción (%)	Humedad (%)	Masa unitaria suelta (kg/m^3)	Masa unitaria compacta (kg/m^3)
AGN	2934,93	1,48	1,17	1556,83	1674,56
AFN	2726,46	1,36	0,59	1540,07	1615,57
AFR-RCe TMN 4	2654,77	9,61	0,62	1178,65	1223,80
AFR-RCe TMN 30	2161,37	9,61	0,47	1248,16	1426,55
AFR-RCo TMN 3/8	2826,19	9,19	3,27	1259,2	1320,30
AFR-RCo TMN 16	2701,17	9,19	3,74	1225,77	1380,66
AFR-RL TMN 3/8	2800,89	16,96	0,86	1091,94	1177,33
AFR-RL TMN 16	2707,71	16,96	0,89	1042,28	1223,21

En la Tabla 10 se puede observar que los AFR tienen bajo contenido de materia orgánica en comparación con los AFN; esto debido a que cuando el RCD se obtiene directamente de la obra y su almacenamiento es óptimo, no llega a ser contaminado.

Tabla 10. Contenido de materia orgánica de AFR y AFN.

		
AFR-RCe TMN 4	AFR-RCe TMN 30	AFR-RCo TMN 16
		
AFR-RCo TMN 3/8”	AFR-RL TMN 16	AFR-RL TMN 3/8”
		

AFN

Como superplastificante se utilizó un aditivo líquido Sika Plast – 5500, compuesto por resinas sintéticas y polímeros de última generación. Este compuesto se caracteriza por ser un excelente reductor de agua, pero al mismo tiempo cuenta con un sostenimiento de la plasticidad superior a los superplastificantes tradicionales. No contiene cloruros. En la Tabla 11 se muestra más información del superplastificante suministrada por la ficha técnica del fabricante.

Tabla 11. Información Superplastificante Sika Plast – 5500.

Apariencia / Color	Liquido ámbar, color característico
Densidad	1.10 kg/L ± 0.02
pH	Mínimo 3.5
Dosificación	0.3% al 1.0% del peso del cementante

6.2. Determinación del desempeño físico/mecánico de los concretos con reemplazos del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del AFN por AFR.

Se llevaron a cabo cuatro diseños de mezcla para cada tipo de RCD, cada uno con reemplazos progresivos de 25%, 50%, 75% y 100% del AFR por AFN. Además, se diseñó un concreto de referencia utilizando 100% de AFN. Todos los diseños de mezcla siguieron la metodología volumen absoluto establecida por el ACI 211.1, la cual fue modificada con el uso del principio de gradación de Fuller-Thompson en la determinación del contenido de agregados finos y gruesos en la mezcla, asegurando una distribución granulométrica óptima para maximizar la densidad y la cohesión del concreto.

De la Figura 8, Figura 9 y Figura 10 se puede apreciar como a medida que el reemplazo del AFR por el AFN va aumentando en porcentaje esta curva granulométrica se acerca mucho más a la curva granulométrica de Fuller Thompson. Esto nos indica que los AFR promueven una mezcla con mayor densidad y compactación, lo que reduce la cantidad de vacíos entre las partículas y mejora la integridad del concreto. Esta reducción de vacíos también podría generar un aumento de la resistencia final del concreto.

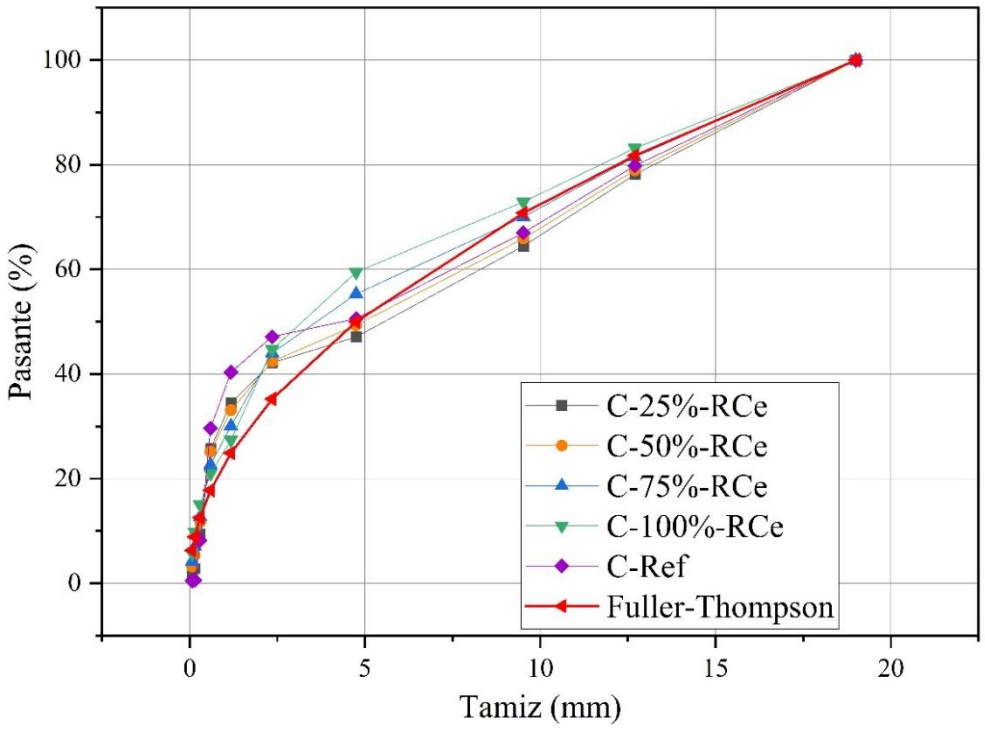


Figura 8. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RCe

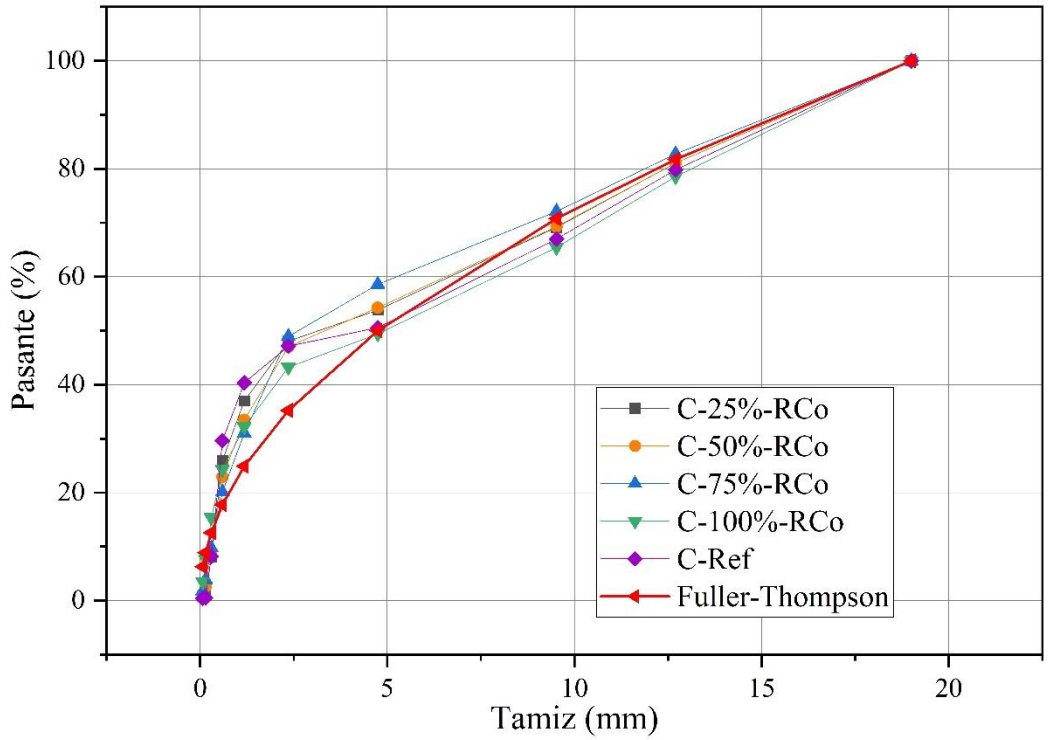


Figura 9. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RCo

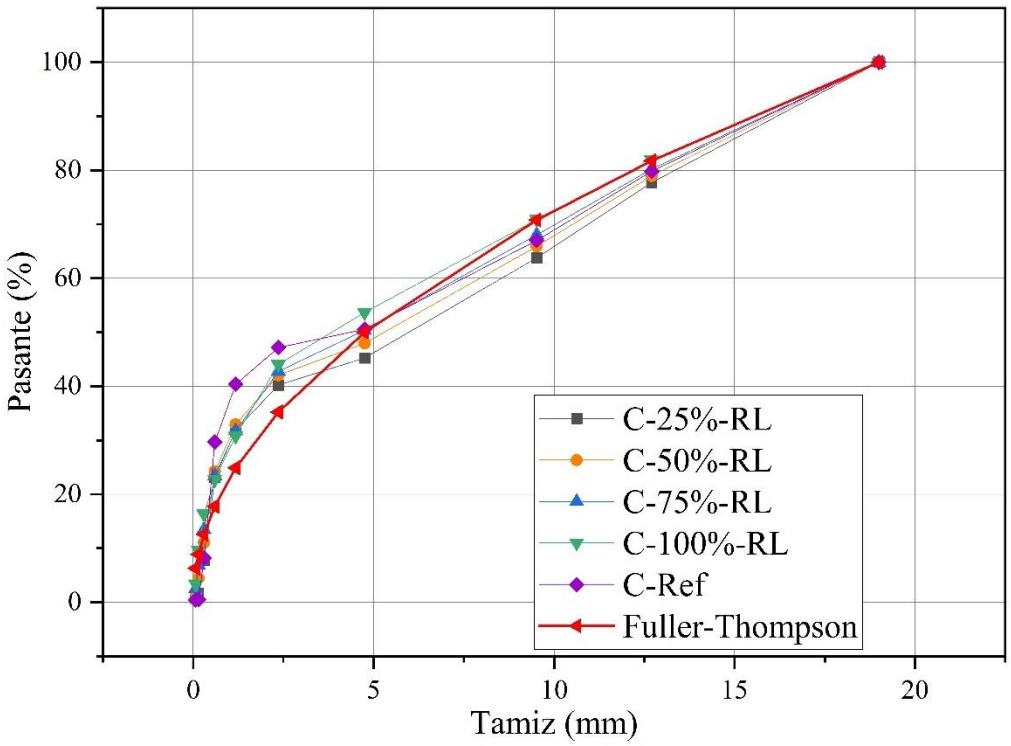


Figura 10. Curvas de ajuste granulométrico concretos con AFR-RL

La Tabla 12,

Tabla 13 y Tabla 14, muestran que un mayor reemplazo de AFR por AFN provoca un incremento significativo en el agua adicional de mezclado, debido a la alta capacidad de absorción de los materiales reciclados. En particular, en las mezclas con AFR-RL, el agua adicional necesaria para la mezcla con un 100% de reemplazo alcanza un incremento del 57,61% en comparación con la mezcla de referencia. Asimismo, se observa un aumento en el uso de superplastificante, que pasa del 0,4% del peso del cemento en la mezcla de referencia al 0,95% en la mezcla C-100% RL, con el fin de mantener la misma manejabilidad en todas las mezclas.

Tabla 12. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RCe

Mezcla	Cemento (kg/m^3)	Agua (kg/m^3)	Agua adicional (kg/m^3)	AGN (kg/m^3)	AFN (kg/m^3)	AFR (kg/m^3)		SP (%)
						TMN 3/8	TMN 16	
C-Ref	450,55	205	-8,35	881,53	837,16	0,00	0,00	0,40
C-25%-RCe	450,55	205	19,47	858,01	587,14	98,43	98,43	0,50
C-50%-RCe	450,55	205	31,87	839,13	414,71	208,58	208,58	0,60
C-75%-RCe	450,55	205	52,94	755,52	237,61	430,23	286,82	0,70
C-100%-RCe	450,55	205	92,67	671,38	0,00	600,78	400,52	0,80

Tabla 13. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RCo

Mezcla	Cemento (kg/m^3)	Agua (kg/m^3)	Agua adicional (kg/m^3)	AGN (kg/m^3)	AFN (kg/m^3)	AFR (kg/m^3)		SP (%)
						TMN 3/8	TMN 16	
C-Ref	450,55	205	-8,35	881,53	837,16	0,00	0,00	0,40
C-25%-RCo	450,55	205	18,75	755,42	684,46	183,60	45,90	0,50
C-50%-RCo	450,55	205	25,71	754,26	455,61	320,81	137,49	0,60
C-75%-RCo	450,55	205	36,91	704,72	250,60	529,36	226,87	0,70
C-100%-RCo	450,55	205	47,06	824,14	0,00	338,53	448,75	0,80

Tabla 14. Dosificación de mezclas de concreto con AFR-RL

Mezcla	Cemento (kg/m^3)	Agua (kg/m^3)	Agua adicional (kg/m^3)	AGN (kg/m^3)	AFN (kg/m^3)	AFR (kg/m^3)		SP (%)
						TMN 3/8	TMN 16	
C-Ref	450,55	205	-8,35	881,53	837,16	0,00	0,00	0,40
C-25%-RL	450,55	205	39,93	792,74	662,70	177,76	44,44	0,70
C-50%-RL	450,55	205	55,88	769,15	446,24	269,32	179,55	0,85
C-75%-RL	450,55	205	72,02	793,10	221,00	400,15	266,77	0,95
C-100%-RL	450,55	205	83,72	857,91	0,00	435,97	290,65	0,95

6.2.1. Caracterización en estado fresco del concreto

Se realizó el ensayo de asentamiento con base en la norma NTC 396 con el fin de que todas las mezclas estén en el mismo rango de trabajabilidad, para esto el uso del superplastificante en estas mezclas fue crucial, ya que la naturaleza porosa de los RCD hacía que las mezclas tendieran a ser más secas Silva et al [47] reporto disminuciones de 70 a 89% en el asentamiento del concreto al incorporar agregados reciclados, por tanto, para lograr el asentamiento deseado se debe saturar los agregados y usar superplastificante para compensar la pérdida de trabajabilidad en todas las mezclas, asegurando la consistencia deseada, el adecuado manejo y la correcta aplicación del concreto.

De las Figuras 12 a la 15, se puede observar que el rango de asentamiento fue de 7,5 cm a 10 cm y se mantuvo constante en las mezclas. Sin embargo, en las mezclas con un 50% de reemplazo por cada tipo de RCD, se observaron diferencias en el asentamiento. Estas variaciones se debieron a las fluctuaciones de la temperatura ambiente durante la realización de las mezclas. El clima fue un factor diferencial constante, ya que hubo días con variaciones significativas de temperatura, lo que dificultó mantener la consistencia del concreto en estado fresco. Para el ladrillo se tomó la decisión de usar mayor cantidad de superplastificante, esto debido a que el ladrillo presentaba una mayor absorción de agua (16,96 %), dada su naturaleza porosa, perjudicando el conformado de los cilindros testigos.

		
C-Ref-1: 8,0 cm	C-Ref-2: 8,7cm	C-Ref-3: 8,0cm

Figura 11. Imágenes de asentamiento C-Ref.

		
C-25%-RCe: 7,5cm	C-50%-RCe-1: 8,8cm	C-50%-RCe-2: 7,8cm
		
C-50%-RCe-3: 7,5cm	C-75%-RCe: 9,3cm	C-100%-RCe: 10,0cm

Figura 12. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RCe.

		
C-25%-RCo: 7,5cm	C-50%-RCo-1: 8,4cm	C-50%-RCo-2: 8,0cm
		
C-50%-RCo-3: 7,5cm	C-75%-RCo: 7,6cm	C-100%-RCo: 8,0cm

Figura 13. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RCo.

		
C-25%-RL: 7,8cm	C-50%-RL-1: 7,5cm	C-50%-RL-2: 9,4cm
		
C-50%-RL-3: 8,4cm	C-75%-RL: 9,7cm	C-100%-RL: 9,2cm

Figura 14. Imágenes de asentamiento concretos con adición de AFR-RL.

6.2.2. Resistencia a la compresión.

En la Figura 15 se puede observar que todas las mezclas (en el rango de sustitución del 25 al 100%) con inclusión de AFR superaron los 28 MPa (resistencia especificada), cumpliendo así con los requisitos del diseño de mezcla. Este desempeño satisfactorio indica que la incorporación de AFR no solo es viable, sino que también contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Estos resultados están en desacuerdo con lo expresado por Panghal et al. 2024 [48], quienes reportan disminución de la resistencia a medida que aumenta el reemplazo de AFR por AFN en las mezclas de concreto, aunque si coincide en el sentido que la máxima resistencia a la compresión también fue con un 25% de reemplazo. Sin embargo, este autor al reemplazar el 100% no reporta disminución en la resistencia a la compresión, en contraste con lo observado en otras investigaciones [49], donde reportan caídas de resistencias del orden del 20%.

Es posible que la mayor resistencia a la compresión obtenida en el presente estudio esté relacionada con una distribución granulométrica óptima la cual se obtuvo mediante la aplicación de la metodología ideal de Fuller-Thompson, como lo muestra la Figura 8, Figura 9 y la Figura 10, lo que favorece la compacidad y densidad de la mezcla, mejorando sus características mecánicas.

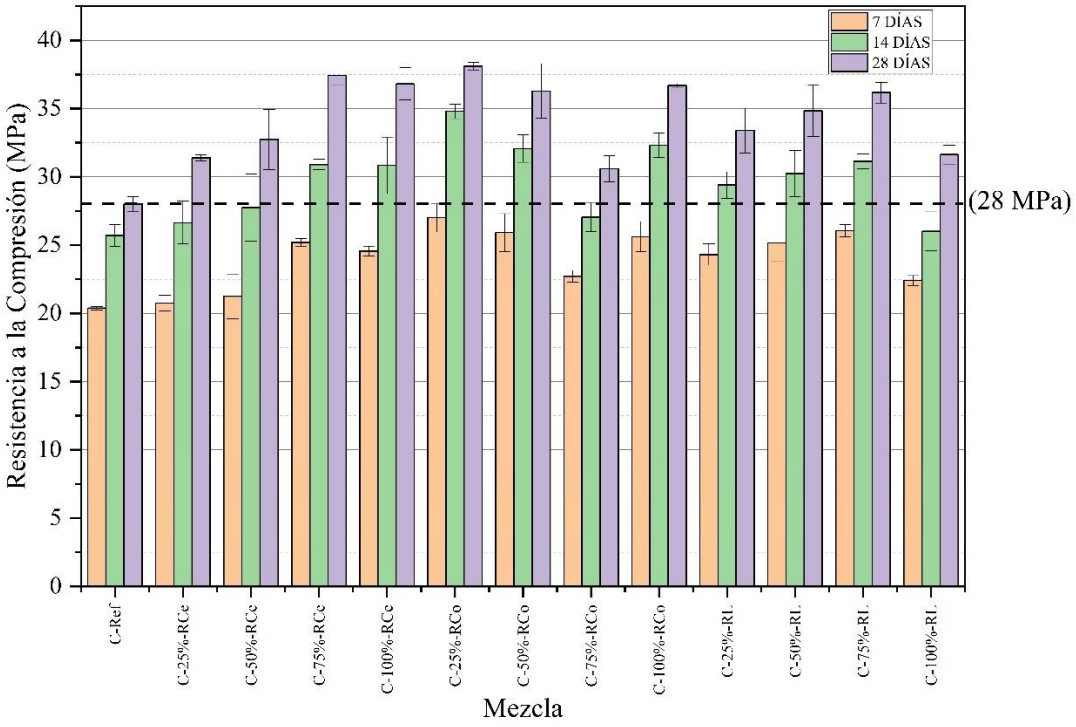


Figura 15. Resistencia a la compresión.

En la Tabla 15 se incluye el incremento resistente reportado por los concretos con AFR con respecto al C-Ref. C-Ref presento resultados inferiores debido a una granulometría menos uniforme, alejada de la gradación ideal propuesta por Fuller-Thompson, lo que resultó en una menor cohesión y resistencia del concreto con AFN.

Tabla 15. Relación de las resistencias a compresión Concretos con AFR / C-Ref

Mezcla	7 días	14 días	28 días
C-25%-RCe	102%	104%	112%
C-50%-RCe	104%	108%	117%
C-75%-RCe	124%	120%	134%
C-100%-RCe	121%	120%	131%
C-25%-RCo	133%	135%	136%
C-50%-RCo	127%	125%	130%
C-75%-RCo	111%	105%	109%
C-100%-RCo	126%	126%	131%
C-25%-RL	119%	114%	119%
C-50%-RL	123%	118%	124%
C-75%-RL	128%	121%	129%
C-100%-RL	110%	101%	113%

6.2.3. Modelación y optimización de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado

6.2.3.1. Análisis de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado

Para el análisis se planteó un polinomio, el cual cumple con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas sobre el error de cada uno de los modelos, a niveles de significancia mayores del 10%.

Por medio de estos modelos se encontró el efecto significativo en la interacción entre AFN (X1) y AFR (X2), con los tres tipos de AFR utilizados: AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL, (p-valor: AFR-RCe 0,069, AFR-RCo 0,000 y AFR-RL 0,000). Es decir, AFN (X1) y (AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL) (X2) están relacionados con la variable resistencia a la compresión (Tabla 16). Igualmente se encontró que la interacción entre AFN con el AGN (p-valor 0,000), en el caso del AFR-RCo es significativa a un nivel de 0,000. Este efecto interacción es importante, dado que indica la dependencia entre estas variables.

Tabla 16. Coeficientes de regresión estimados de resistencia a la compresión, usando AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL (pseudocomponentes).

	AFR-RCe			
Término	**Coeficientes**	**EE del coef.**	**Valor T**	**Valor p**
AFN (X1)	33,53	5,97	-	-
AFR-RCe (X2)	36,77	0,855	-	-
AGN (X3)	79,20	11,10	-	-
X1X2	-98,80	50,20	-1,97	0,069

	AFR-RCo			
Término	**Coeficientes**	**EE del coef.**	**Valor T**	**Valor p**
AFN (X1)	43,07	2,40	-	-
AFR-RCo (X2)	19,37	1,03	-	-
AGN (X3)	154,46	7,38	-	-
X1X2	28,29	4,86	5,82	0,000
X1X3	-269,60	19,40	-13,90	0,000
	AFR-RL			
Término	**Coeficientes**	**EE del coef.**	**Valor T**	**Valor p**
AFN (X1)	28,63	2,94	-	-
AFR-RL (X2)	31,697	0,844	-	-
AGN (X3)	26,10	21,20	-	-
X1X2	34,28	7,55	4,54	0,000

Las expresiones matemáticas fueron:

AFR-RCe $$\hat{y} = 33{,}53\,X1 + 33{,}77X2 + 79{,}20X3 - 98{,}80X1X2 + \varepsilon$$

AFR-RCo $$\hat{y} = 43{,}07\,X1 + 19{,}37X2 + 154{,}46\,X3 + 28{,}29X1X2 - 269{,}61X2X3 + \varepsilon$$

AFR-RL $$\hat{y} = 28{,}63\,X1 + 31{,}697X2 + 26{,}10X3 + 34{,}28X1X2 + \varepsilon$$

En la Tabla 17, se presenta el análisis de la varianza para verificar la idoneidad del modelo lineal, se evidencia que los errores contribuyen menos al modelo (Suma de cuadrados del Error residual 31,36, 6,44 y 32,75 y respectivamente), en comparación con el efecto del AFN, AFR (AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL) y AGN con una suma de cuadrados de la regresión de 186,5769, 298,103 y 163,809 respectivamente. Este resultado sugiere que se ejerció un buen control en la experimentación. En relación con los resultados de las pruebas de hipótesis evaluadas para cada una de las variables, se encontró que:

- El coeficiente de determinación múltiple R^2 revela que el modelo explica el 85,61% 97,88% y 83,34% (AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL respectivamente), en la variación en la resistencia a la compresión (Y) obtenida para cada uno de los modelos, lo cual está asociado al AFN, AFR y AGN, siendo esta la mejor medida de la variación de la resistencia a la compresión (Y) obtenida.
- La prueba de hipótesis para la falta de ajuste (Ho: Modelo adecuado) no proporciona suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de falta de ajuste no significativa, a un nivel de significancia de 0,828 en el modelo para AFR-RL y 0,762 para el modelo de AFR-RCe, respecto al modelo para concreto no fue calculado dado que el modelo de regresión se ajusta bien a los datos (97,88%), la variabilidad de los puntos repetidos se atribuye principalmente al error aleatorio y no hay necesidad de evaluar la falta de ajuste. Por lo tanto, se concluye que los modelos son adecuados. Además, para AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL se encontró que el efecto cuadrático (interacción) es significativo (p-valor: 0,069, 0,000 y 0,000 respectivamente).

Tabla 17. Análisis de varianza para el modelo lineal utilizando AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL

	AFR-RCe r^2: 85,61 %				
Fuente	**GL**	**SC**	**MC**	**Valor F**	**Valor p**
Regresión	3	186,576	62,1919	27,76	0,000
Lineal	2	177,892	19,8448	8,86	0,003
AFN*AGN	1	8,683	8,6834	3,88	0,069
Error residual	14	31,363	2,2402		
Falta de ajuste	1	0,229	0,2290	0,10	0,762
Error puro	13	31,134	2,3949		
Total	17	217,939			
	AFR-RCo r^2: 97,88%				
Fuente	**GL**	**SC**	**MC**	**Valor F**	**Valor p**
Regresión	4	298,106	74.527	138.78	0.000
Lineal	2	35,291	89.946	167.50	0.000
~~Cuadrático~~					
AFN*AFR	1	159.005	18.205	33.90	0.000
AFN*AGN	1	103.811	103.811	193.32	0.000

Error residual	12	6.444	6.444	0.537	
Total	16	304.550			

		AFR-RL r^2: 83,34%			
Fuente	**GL**	**SC**	**MC**	**Valor F**	**Valor p**
Regresión	3	163,809	54,6030	23,34	0,000
Lineal	2	115,624	10,5192	4,50	0,031
Cuadrático	1	48,185	48,1848	20,60	0,000
AFN*AFR	1	48,185	48,1848	20,60	0,000
Error residual	14	32,751	2,3394		
Falta de ajuste	1	0,124	0,1238	0,05	0,828
Error puro	13	32,627	2,5098		
Total	17	196,560			

6.2.3.2. Optimización de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Las condiciones de optimización se basan en los resultados obtenidos en la experimentación, los cuales son mínimo, máximo y media, dado que por fuera de estos valores ya no son predecibles. En la Tabla 18 se muestra los valores de las estadísticas descriptivas de los resultados obtenidos experimentalmente, con los cuales podemos apreciar que realizar una optimización entre 27 y 28 MPa no tiene fundamento, dado los altos valores obtenidos.

Tabla 18. Estadísticas descriptivas de la resistencia a la compresión

Variable	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
AFR-RCe	34,209	3,58	27,02	38,39
AFR-RCo	34,39	4,36	26,8	38,55
AFR-RL	33,784	3,4	26,89	39,05

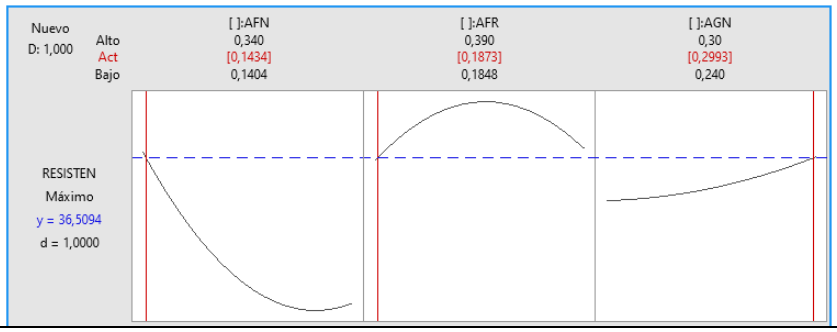
Utilizando los modelos polinómicos obtenidos, y por medio del método de distancia óptima, se obtuvo la solución para las condiciones óptimas (Tabla 19), dando como parámetros para optimizar entre más grande mejor, esto requiere de un valor mínimo de la resistencia tolerable dentro del rango obtenido en la experimentación y un valor objetivo igualmente dentro del rango de los valores obtenidos en cada uno de los modelos (Ver Figura 16).

Tabla 19. Condiciones de la optimización

AFR-RCe
Mínimo de 28 MPa, y un valor objetivo de 36.5 MPa.
X1: AFN = 0,143 X2: AFR-RCe = 0,187 X3: AGN =0,3
Resistencia a la compresión = 36,5 MPa, Predictibilidad = 1,0 (Figura 16a)
AFR-RCo
Mínimo de 28 MPa, y un valor objetivo de 36,5 MPa
X1: AFN = 0,143 X2: AFR-RCo = 0,2158 X3: AGN =0,25
Resistencia a la compresión = 36,5 MPa, Predictibilidad = 1,0 (Figura 16b)
AFR-RL
Mínimo de 28 MPa, y un valor objetivo de 36,5 MPa.
X1: AFN = 0,072 X2: AFR-RL = 0,307 X3: AGN =0,25
Resistencia a la compresión = 36.4 MPa, Predictibilidad = 0.986 (Figura 16c)

En la Figura 16 se muestran los resultados de la simulación en cada uno de los materiales que se utilizó en la experimentación, en esta se proporciona el valor para una resistencia objetivo de diseño de 36,5 MPa. En este contexto se observa que el valor deseado se alcanza con una predictibilidad de aproximadamente uno (1).

a) AFR-RCe



b) AFR-RCo

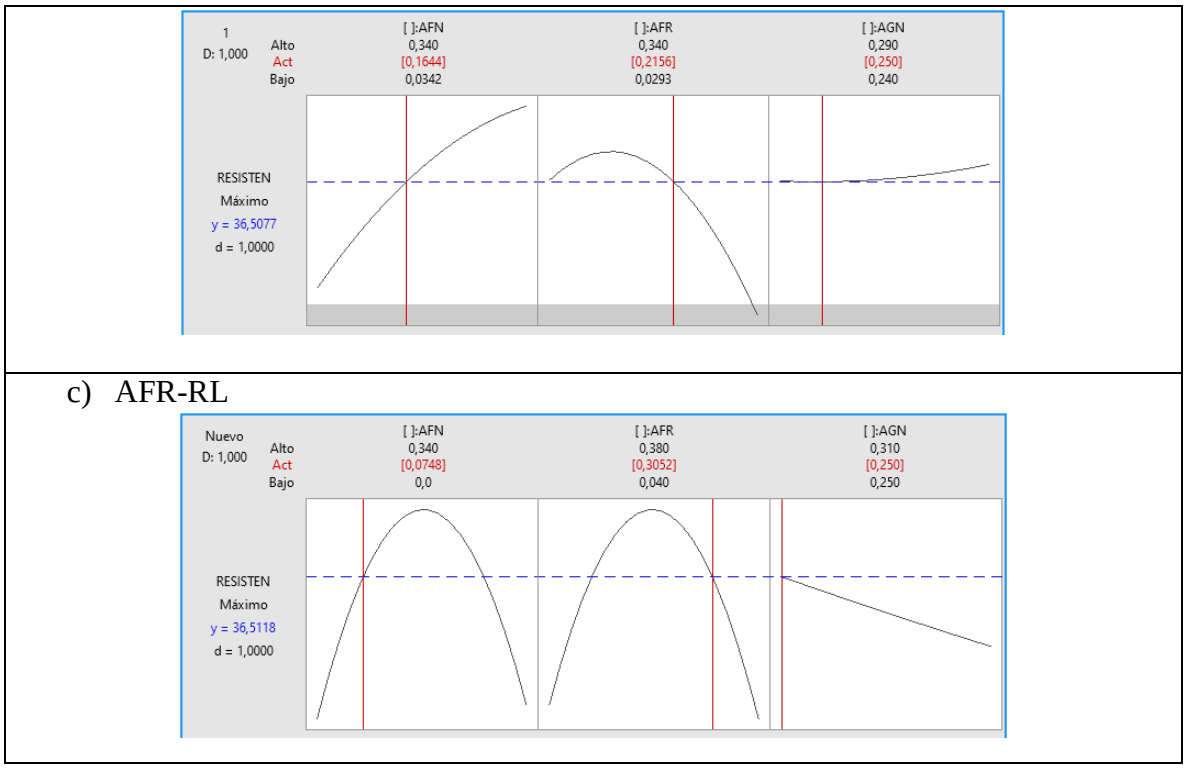


Figura 16. Optimización de la resistencia a la compresión para cada uno de los materiales utilizados.

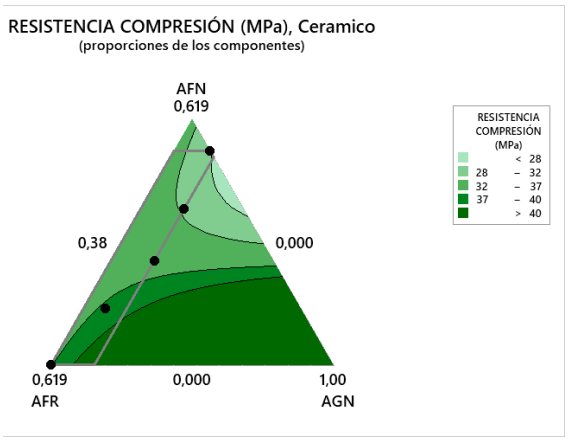
Dado que en la investigación se estableció un diseño de concreto con una resistencia objetivo de 36,5 MPa y se buscó desarrollar una mezcla que incorporara los tres AFR de manera conjunta, se analizaron los resultados mostrados en la Figura 17.

En el caso del AFR-RCe, se observó que, con proporciones de AFN entre 0 % y 25,5 %, AFR-RCe entre 0 % y 60 %, y AGN entre 38 % y 75 %, la inclusión de AFN tiende a disminuir la resistencia a la compresión. Esto indica que las mezclas con AFR-RCe logran resistencias entre 32 y 37 MPa en proporciones medias, pero presentan limitaciones significativas a niveles más altos. Por esta razón, se seleccionó un 25 % de AFR-RCe en la mezcla, buscando un equilibrio que minimice su impacto negativo y contribuya al desempeño general del concreto.

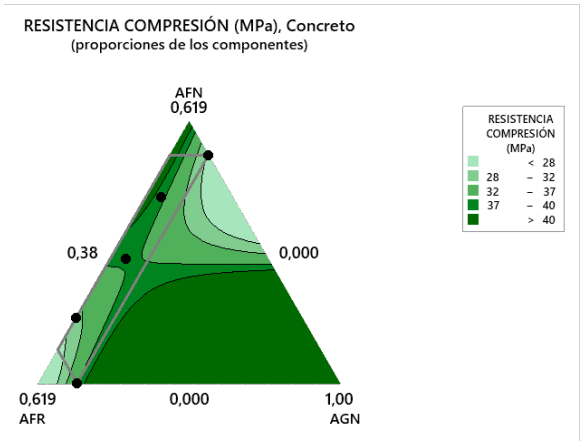
Para el AFR-RCo las mezclas con mayores proporciones de este tipo de arena presentan resistencias a la compresión superiores a 40 MPa, evidenciando que este tipo de AFR contribuye significativamente al desempeño mecánico de la mezcla. Por lo cual se opta por un 50% de AFR-RCo

En el caso de AFR-RL con un porcentaje entre 13.74% y el 51.3%, AFN entre 8.7% y el 46% y AGN entre 39.99% y 50%, se predice una resistencia deseada (36.5 MPa). Lo que corresponde que las mezclas con altas proporciones de AFR-RL tienen una resistencia a la compresión inferior, usualmente por debajo de 32 MPa. Sin embargo, la inclusión de un porcentaje moderado (25 %) permite minimizar los efectos negativos de su mayor absorción de agua y porosidad.

a)



b)



c)

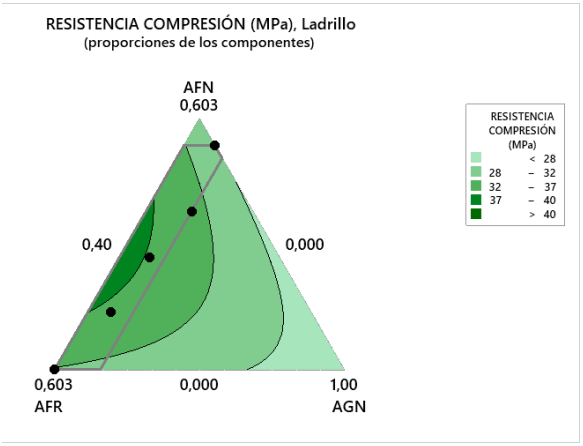


Figura 17. Optimización personalizada de la resistencia a la compresión para el AFR, AFN y AGN.

Con base en los resultados obtenidos, se definió la mezcla de concreto C-Mix, compuesta por la combinación de los tres agregados finos reciclados (AFR-RCe, AFR-RCo y AFR-RL) en proporciones de reemplazo respecto al AFN de 25 %, 50 % y 25 %, respectivamente. Para evaluar su desempeño, se elaboraron cilindros para el ensayo de compresión, obteniéndose un valor promedio de resistencia a la compresión de 36,06 MPa (Ver Tabla 20), lo que se aproxima al objetivo establecido de 36,5 MPa.

Tabla 20. Resistencia a la compresión 28 días C-Mix

Resistencia a la compresión 28 días Concreto Mix (C-Mix)			
C-Mix	36,8	36,18	35,22

6.2.4. Caracterización física de los concretos

A continuación, se puede observar los resultados obtenidos de la caracterización física de los concretos, los cuales se llevaron a cabo únicamente en las mezclas con un 100% de

sustitución de AFR por AFN. Esta decisión se tomó con el objetivo de analizar de manera específica el efecto individual de cada tipo de AFR en las propiedades del concreto, sin la influencia de mezclas combinadas o proporciones parciales.

6.2.4.1.Densidad absorción y porosidad

Como se observa en la Tabla 21, los concretos elaborados con AFR presentan una absorción de agua de hasta un 10,81%, un valor significativamente alto en comparación con C-Ref con un valor de 6,59%, que esta de acuerdo con las características de los agregados presentadas inicialmente. Este comportamiento se atribuye a la estructura porosa inherente de los AFR, lo que resulta en un aumento en la absorción de agua y en el volumen de poros permeables. Entre las mezclas con AFR, la mezcla C-100%-RCe presenta la menor densidad (2,60 g/cm³), mientras que la mezcla C-100%-RL exhibe el mayor porcentaje de absorción (10,81%). Esto evidencia que las propiedades físicas del concreto, especialmente en términos de densidad y absorción, están directamente influenciadas por las características del AFR utilizado.

Tabla 21. Resultados ensayo absorción, densidad y porosidad.

Mezcla	% de Absorción	Densidad aparente (g/cm^3)	Volumen de poros permeables (%)
C-Ref	6,59	2,70	15,02
C-100%-RCe	10,49	2,60	21,93
C-100%-RCo	7,62	2,65	16,63
C-100%-RL	10,81	2,64	22,68
C-Mix	9,19	2,54	17,60

6.2.4.2.Succión capilar

Las curvas de absorción capilar, presentadas en la Figura 18 obtenidas a partir de la caracterización de los distintos tipos de concreto, muestran que los concretos con AFR exhiben una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con el C-Ref. Este resultado era previsible, ya que los concretos reciclados presentan una porosidad más pronunciada en sus agregados, generando una red más extensa de capilares en el concreto. Este fenómeno incrementa la penetración del líquido por acción capilar, lo que facilita una mayor absorción de agua [50]. Se observa que C-100%-RL registra valores más elevados, siendo 4.009 mm la máxima lectura alcanzada, esto debido a que es el concreto con mayor porcentaje de absorción y mayor volumen de poros permeables.

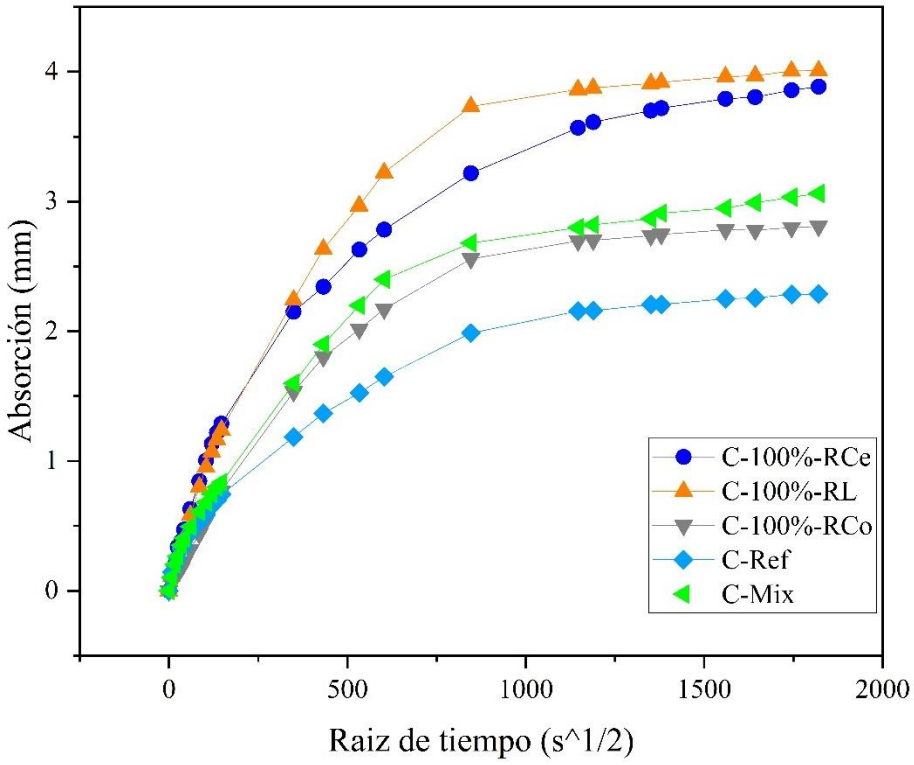


Figura 18. Curvas de absorción capilar en concretos.

6.2.5. Caracterización microestructural

La microestructura de las mezclas con AFR, presentada en la Figura 19, evidencia las diferencias intrínsecas de cada material. La mezcla C-100%-RCo muestra una estructura más compacta y homogénea, lo que garantiza un mejor desempeño mecánico, un resultado consistente con los valores obtenidos en el apartado de resistencia a la compresión, donde los AFR-RCo alcanzaron los resultados más altos. En contraste, la mezcla C-100%-RL exhibe una mayor porosidad y menor cohesión, lo cual se refleja en el volumen de poros permeables, que registra el valor más alto entre todas las mezclas (22,68 %), lo que podría comprometer su durabilidad. Finalmente, la mezcla C-Mix combina las propiedades de las diferentes arenas recicladas, equilibrando las limitaciones de cada tipo individual y ofreciendo una solución prometedora para aplicaciones constructivas.

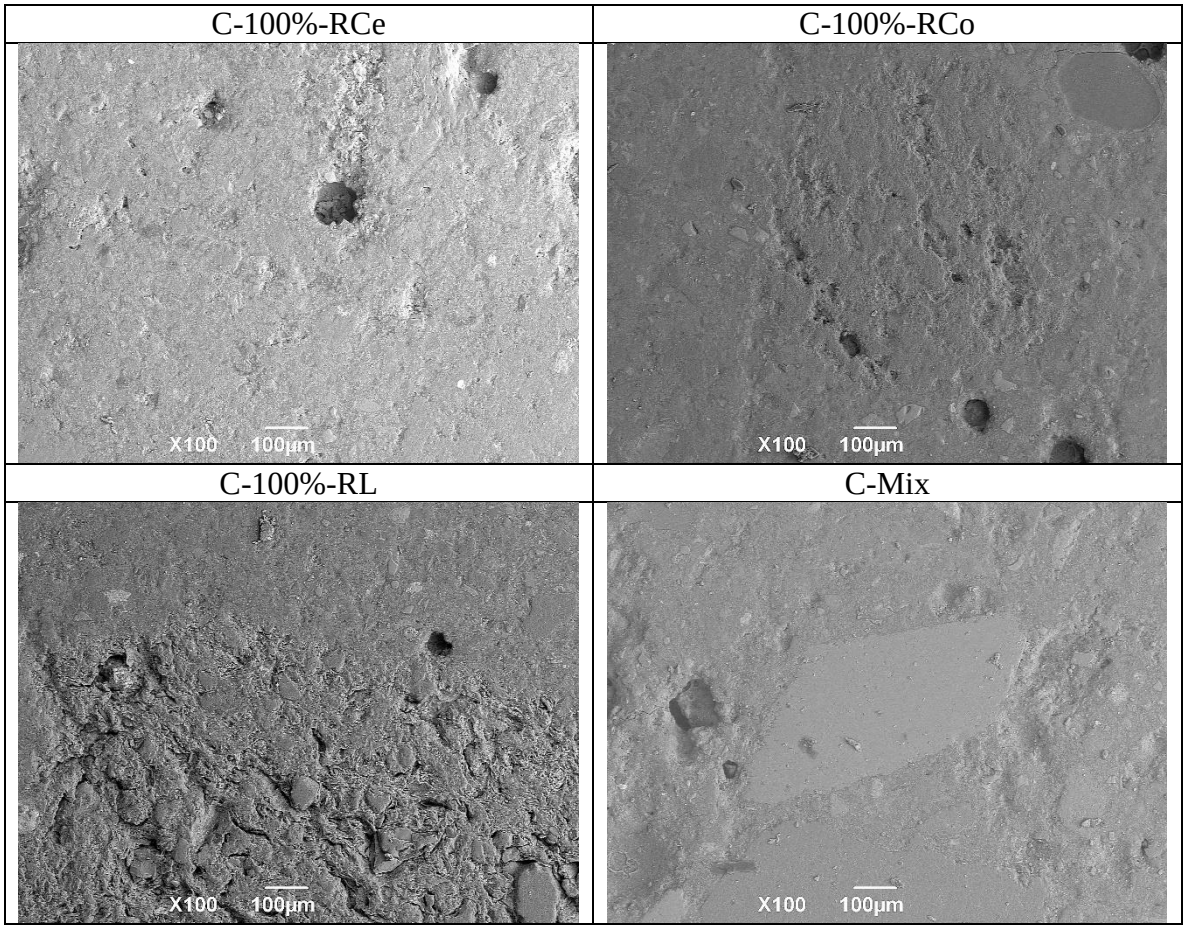


Figura 19. Microestructura de las mezclas.

6.3. Aplicación constructiva

Para la aplicación constructiva se diseñó una viga estructural que presenta la siguiente configuración. En la Figura 20 se muestra la sección transversal de la viga y la cantidad de refuerzo utilizado.

- **Tipo de elemento:** Simplemente apoyada.
- **Tipo de falla:** Fluencia acero en tracción.
- **Longitud de la viga:** 1,50 m.
- **Sección transversal:** ancho x altura = 20 x 25 cm.
- **Aceros de refuerzo:** fy = 4200 kg/cm2.
- **Cuantía de refuerzo ρ:** 0,00568

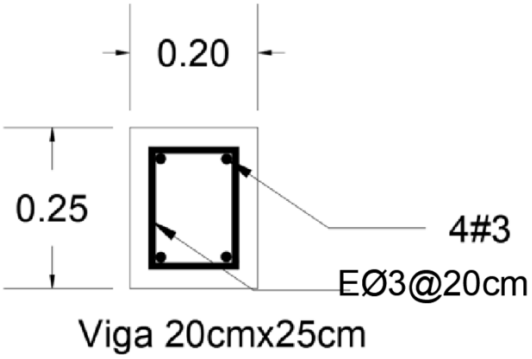


Figura 20. Sección transversal viga reforzada

Las vigas se fabricaron utilizando dos tipos de mezcla: una con el concreto de referencia (Viga Ref) y otra con una mezcla de concreto que combina las tres arenas recicladas (Viga Mix). Las dosificaciones correspondientes se presentan en la Tabla 22. En esta tabla se observa que la Viga Mix requiere una cantidad significativamente mayor de agua adicional en comparación con la Viga Ref, debido a la alta capacidad de absorción de los AFR. Asimismo, se incrementó la cantidad de superplastificante para garantizar una trabajabilidad similar en ambas mezclas.

Tabla 22. Diseño de mezcla Viga mix, Viga Ref

Mezcla	Cemento (kg/m^3)	Agua (kg/m^3)	Agua adicional (kg/m^3)	AGN (kg/m^3)	AFN (kg/m^3)	AFR (kg/m^3)			SP (%)
						AFR-RCe	AFR-RCo	AFR-RL	
Viga Mix	450,55	205	93,4	687,1	0	256,9	256,9	527,2	0.7
Viga Ref	450,55	205	-8,35	881,53	837,16	0	0	0	0.4

Las vigas fueron sometidas al ensayo de flexión pura con dos cargas puntuales en los tercios medios de la luz (Ver Figura 21). El ensayo es flexión pura porque teniendo en cuenta la ubicación de las cargas, en el tercio medio no se tienen esfuerzos cortantes y solo está sometido a una flexión constante, esta interpretación se puede observar en las siguientes ilustraciones de los diagramas de cortante y momento (Ver Figura 22 y Figura 23).

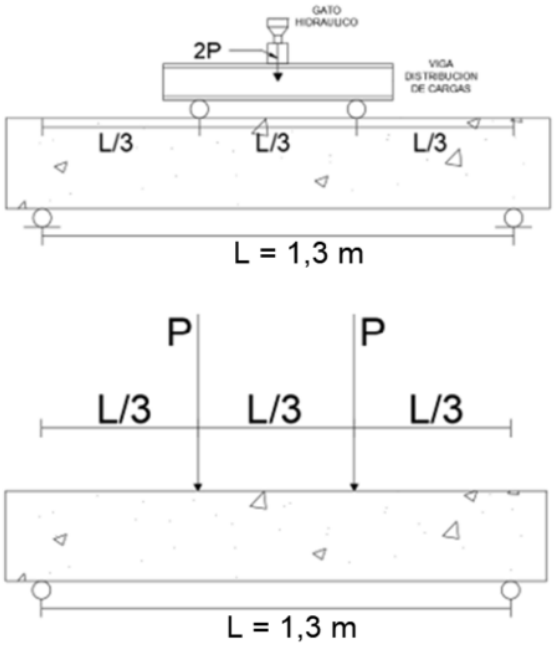


Figura 21. Cargas aplicadas sobre la viga.

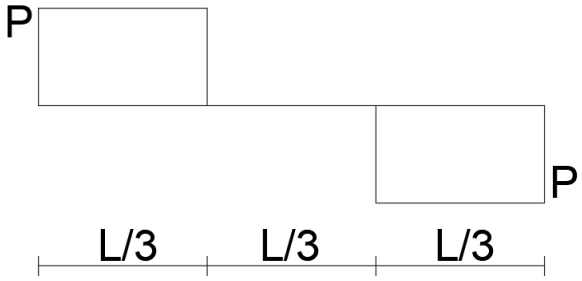


Figura 22. Diagrama de cortante.

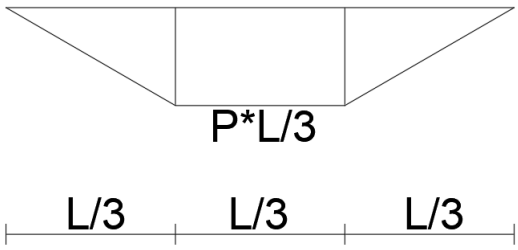


Figura 23. Diagrama de momento.

Las vigas se ensayaron en una máquina universal WPM-ZD40 (capacidad de 400 kN) de la Escuela de Ingeniería Civil, en la cual se adaptó el montaje del ensayo trabajando con un perfil metálico sobre dos cilindros metálicos para lograr las cargas puntuales, estos cilindros también se utilizaron para tener las reacciones necesarias en los apoyos y así obtener una viga simplemente apoyada como se puede observar en la Figura 24. La carga fue aplicada con una razón de entre 1,5-2,0 mm/min, midiendo la deflexión de los elementos a través de un

deformímetro de carátula. Para el ensayo los apoyos se ubicaron a 10 cm (Ver Figura 25) de las caras laterales de la viga, teniendo así una longitud efectiva de 1,3 m.



Figura 24. Montaje de ensayo.



Figura 25. Apoyo a 10 cm de la cara lateral.

Para predecir el comportamiento de la viga sometida a flexión pura se realizó un diagrama Momento-Curvatura utilizando el modelo de “Kent and Park” para concreto confinado con el cual a partir de las ecuaciones para flexión en vigas se puede obtener el momento de agrietamiento y momento último, los resultados obtenidos fueron 8,25 KNm y 18,51 KNm respectivamente. Para el caso de estudio con dos cargas puntuales se tiene momento M=P*L/3. Aplicando la anterior ecuación y reemplazando L por la longitud efectiva (1,3 m) se tiene que la carga P es igual a 19,03 KN para carga de agrietamiento y 42,71 KN para carga última, teniendo en cuenta que la carga registrada por la máquina universal es equivalente a 2P. Se multiplicó los anteriores valores por dos obteniendo 38,08 KN y 85,43 KN respectivamente. El diagrama Momento-Curvatura se puede observar en la Figura 26.

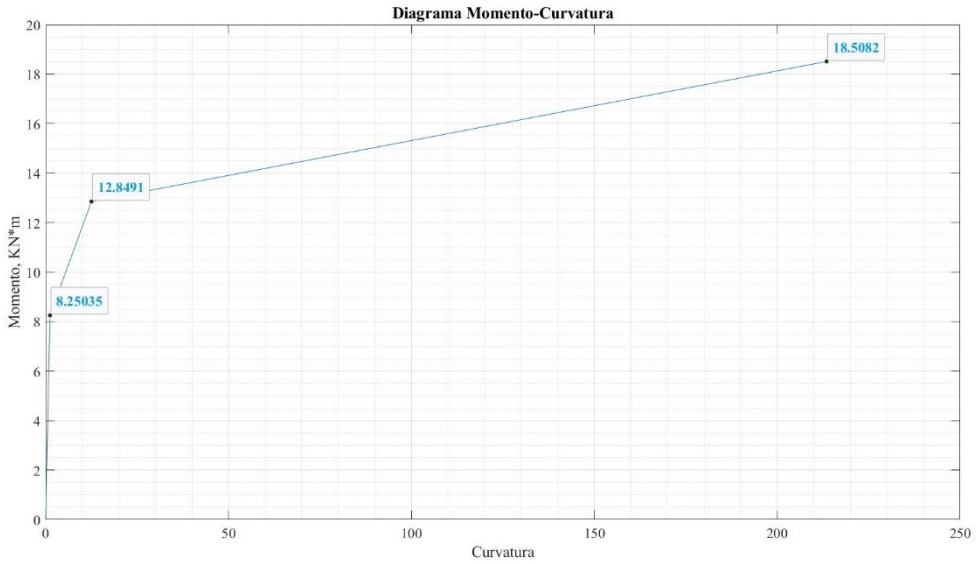


Figura 26. Diagrama momento-curvatura.

Los resultados del ensayo a flexión fueron procesados con el software Matlab y se pueden observar en la Figura 27. Estos resultados demuestran que las vigas fabricadas con agregados finos reciclados (AFR) presentan un mejor desempeño estructural en comparación con las vigas que contienen agregados finos naturales (AFN). En particular, la viga con AFR soportó mayores cargas tanto en el punto de agrietamiento inicial (39,12 KN frente a 34,37 KN) como en la carga última (82,30 KN frente a 72,39 KN). Estos hallazgos evidencian el potencial de los AFR para su aplicación en elementos constructivos, destacando su capacidad para mejorar la resistencia y el comportamiento mecánico de las estructuras, y contribuyen al avance hacia soluciones más sostenibles en la construcción

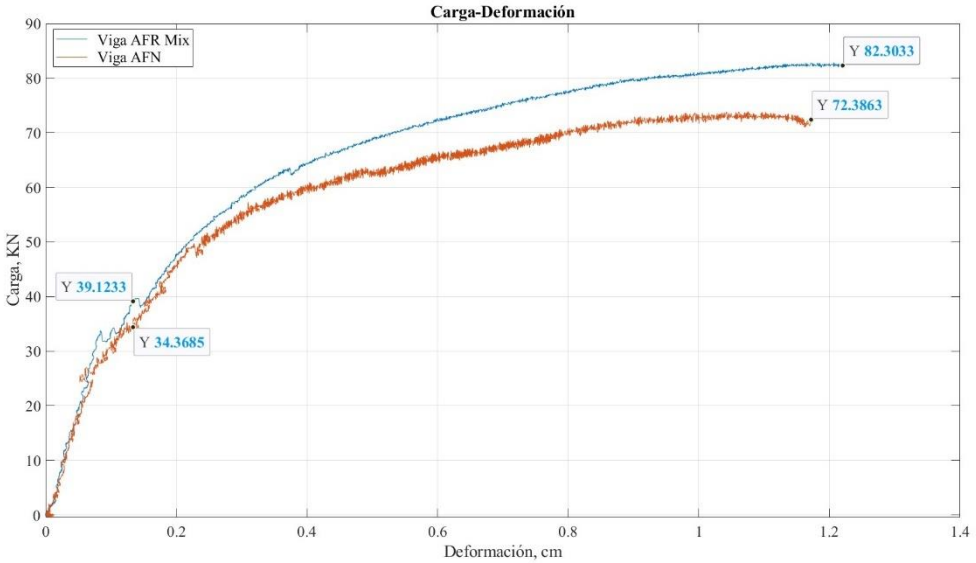


Figura 27. Gráfica carga- deformación C-Mix vs C-Ref.

7. CONCLUSIONES

- Los agregados reciclados (AFR) y los naturales (AFN) presentan diferencias significativas en sus propiedades, lo que repercute directamente en el diseño de mezclas de concreto. Una desventaja notable de los AFR es su alta capacidad de absorción en comparación con los AFN, lo que incrementa la cantidad de agua de mezclado y el uso de superplastificante, llegando a representar un aumento del 50%, como se observó en el caso del C-100%-RL. Sin embargo, los AFR tienen la ventaja de contener niveles casi nulos de materia orgánica, a diferencia de los AFN, lo que mejora la resistencia, durabilidad y adhesión del concreto.
- La sustitución de AFN por AFR 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 C-Ref con los distintos concretos con AFR fueron siempre superiores, en el rango estudiado de reemplazo (25-100%). Además, la trabajabilidad del concreto fue adecuada, logrando asentamientos entre 75 mm y 100 mm.
- La optimización en el diseño de mezclas permitió alcanzar una amplia variedad de alternativas con alta precisión, logrando resistencias de diseño de 36,5 MPa. Los resultados muestran que al reducir el uso de AFN y aumentar la proporción de AFR, se puede mejorar la resistencia a la compresión. Por lo tanto, el AFR representa una solución efectiva para alcanzar y superar las exigencias de diseño.
- La comparación entre el "Modelo de Kent y Park" y los resultados experimentales mostró errores del 2,74% y 9,81% en la carga de agrietamiento para vigas con AFR y AFN, respectivamente, y del 3,66% y 15,27% en la carga última. Estos valores reflejan una mayor precisión del modelo teórico para vigas con AFR, lo que refuerza la viabilidad de utilizar este material. En el ensayo a flexión, la viga con AFR soportó una carga última superior a la de la viga con AFN, demostrando su capacidad para cumplir con los requisitos estructurales.
- El reemplazo del agregado fino natural por agregado fino reciclado puede llegar a contribuir a la sostenibilidad de la construcción, reduciendo la extracción de recursos naturales (arenas de río) y promoviendo la reutilización de residuos de construcción y demolición. Esto no solo disminuiría el impacto ambiental, sino que también abre la posibilidad de una gestión más eficiente de los residuos en la industria de la construcción. Se recomienda que futuras investigaciones analicen la durabilidad química a mediano y largo plazo de los concretos con los agregados finos reciclados con el fin de viabilizar su uso en aplicaciones estructurales y/o no estructurales. Complementariamente, un análisis de ciclo de vida de estos materiales permitiría sustentar desde el punto de vista ambiental los efectos positivos del uso masivo de estos agregados reciclados, motivando a las empresas constructoras a seleccionar este tipo de materiales en sus diseños de mezcla de concreto.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] M. A. C. I. Farmington Hills, “ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete,” Farmington Hills, 2002.

[2] A. Lotfy and M. Al-Fayez, “Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate,” *Cem Concr Compos*, vol. 61, pp. 36–43, May 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009.

[3] P. Enrique *et al.*, “Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción 1,” vol. 78, pp. 121–127, 2014.

[4] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties,” *Constr Build Mater*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.

[5] N. C. Zúñiga and D. R. Picado, “Índices y Bases de Datos: Políticas de Uso: Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Evaluation of samples of the coarse aggregate from concrete wates to produce new concrete,” vol. 12, 2021.

[6] L. S. Oliveira, S. C. Angulo, and V. M. John, “Quantifying the informal sand market and its consequences: The case of Brazil,” *Environ Dev*, vol. 51, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.envdev.2024.101032.

[7] Congreso de Colombia, *Ley_2111_de_2021*.

[8] Congreso de Colombia, *Ley_599_de_2000*.

[9] Agencia Nacional de Minería, “Información del sector y estadísticas.” Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/?q=regalias-contraprestaciones-economicas2

[10] G. Puente de Andrade, G. de Castro Polisseni, M. Pepe, and R. D. Toledo Filho, “Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model,” *Constr Build Mater*, vol. 252, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119091.

[11] R. A. Robayo Salazar, P. E. Mattey Centeno, Y. F. Silva Urrego, D. M. Burgos Galindo, and S. Delvasto Arjona, “Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento,” *Revista Tecnura*, vol. 19, no. 44, p. 157, Apr. 2015, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12.

[12] J. Sebastián, C. Muñoz, and C. E. Carmona García, “Gestión integral de residuos de construcción y demolición en Colombia: una aproximación basada en la metodología del marco lógico,” 2016.

[13] Carlos Albeiro Pacheco Bustos, Luis Guillermo Fuentes Pumarejo, Hugo Alexander Rondón Quintana, and Édgar Humberto Sánchez Cotte, “Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión,” Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/journal/852/85252030015/html/.

[14] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, “Resolución 1257 de 2021”.

[15] Icontec, “NTC 6421. Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico,” Jul. 14, 2021

[16] Icontec, “NTC 6422. Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados,” 2021

[17] L. G. López-Yépez, R. A. Bermúdez, S. L. Uribe-Celiz, S. E. Ospina-Lozano, and F. J. Vázquez-Rodríguez, “Factibilidad del remplazo de agregados finos reciclados de demolición en las propiedades físicas de concreto estructural,” *Ingenierias*, vol. 23, no. 86, Jan. 2020, doi: 10.29105/ingenierias23.86-5.

[18] C. Bedoya and L. Dzul, “Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana,” 2015. Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: www.ricuc.cl

[19] N. Garg and S. Shrivastava, “Mechanical, durability and sustainability assessment of rendering mortar with synergistic utilisation of recycled concrete and ceramic insulator fine aggregates,” *Journal of Building Engineering*, vol. 76, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107269.

[20] Programme des Nations Unies pour l’environnement. GRID-Geneva., *Sand and sustainability : finding new solutions for environmental governance of global sand resources : synthesis for policy makers*. 2019. Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available:https://unepgrid.ch/storage/app/media/documents/Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf

[21] Villa Olga, “Sostenibilidad del ecosistema río cauca ante la explotación de materiales de arrastre por parte de los areneros artesanales del corregimiento del paso de la bolsa-jamundi,” 2018.

[22] Carlos Bedoya, “CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE 2011,” 2011.

[23] C. Ulsen, J. L. Antoniassi, I. M. Martins, and H. Kahn, “High quality recycled sand from mixed CDW - Is that possible?,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, pp. 29–42, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.02.057.

[24] Semana, “Tres ejemplos de edificaciones que dejan huella verde.”, [Online]. Available: https://www.semana.com/sostenibilidad/negocios-verdes/articulo/tres-ejemplos-de-edificaciones-que-dejan-huella-verde/202100/

[25] Catorce6 “Ciudades llenas de escombros,” 2017. Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: [Online]. https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/habitat/12015%20ciudades-llenas-de-escombros.

[26] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, “Resolución 0472 de 2017”.

[27] Icontec, “NTC 174. CONCRETOS. ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO,” 2018

[28] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, “Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review,” Jul. 30, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

[29] J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. López, J. M. Fernández, and J. De Brito, “Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing,” *Constr Build Mater*, vol. 40, pp. 679–690, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036.

[30] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.017.

[31] S. Omary, E. Ghorbel, and G. Wardeh, “Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties,” *Constr Build Mater*, vol. 108, pp. 163–174, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.

[32] S. Jamil, J. Shi, and M. Idrees, “Effect of various parameters on carbonation treatment of recycled concrete aggregate using the design of experiment method,” *Constr Build Mater*, vol. 382, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131339.

[33] S. K. Kirthika and S. K. Singh, “Durability studies on recycled fine aggregate concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 250, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118850.

[34] K. D. Nekrasov, “(Citado en C. Bedoya and L. Dzul, ‘Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana.’”.

[35] M. E. Sosa, A. Lamnek, Y. A. Villagrán, D. E. Benito, C. J. Zega, and A. A. Di Maio, “COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO RECICLADO EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA,” 2016.

[36] P. E. Mattey Centeno, R. A. Robayo Salazar, J. A. Torres Rico, P. A. Ramos Barragán, and S. Delvasto Arjona, “Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de

ferrocemento con agregado fino reciclado," *Informador Técnico*, vol. 79, no. 2, p. 146, Dec. 2015, doi: 10.23850/22565035.159.

[37] G. Puente de Andrade, G. de Castro Polisseni, M. Pepe, and R. D. Toledo Filho, "Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model," *Constr Build Mater*, vol. 252, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119091.

[38] M. Amario, C. S. Rangel, M. Pepe, and R. D. Toledo Filho, "Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model," *Cem Concr Compos*, vol. 84, pp. 83–92, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.016.

[39] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. B. Koenders, and E. Martinelli, "A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete," *Constr Build Mater*, vol. 122, pp. 362–372, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.061.

[40] Marco Pepe, *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications*.

[41] Cornell J.A, *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and Analysis of Mixture Data*. New York., 2002.

[42] Kuhn. Max, "The caret package. R Found. Stat. Comput.," *URL https//cran. R-project. org/packa-ge= caret.*, Vienna, Austria., 2012.

[43] L. Evangelista and J. de Brito, "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cem Concr Compos*, vol. 32, no. 1, pp. 9–14, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.

[44] M. E. Sosa, C. J. Zega, and Y. A. Villagrán Zaccardi, "Evaluación de métodos para la determinación de la absorción en agregados finos reciclados," *Revista Hormigón 63*, Mar. 2023.

[45] icontec, "Norma técnica ntc colombiana 237 ingeniería civil y arquitectura. método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino e: standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate correspondencia: esta norma es equivalente (EQV) a la ASTM C128-93," 1995.

[46] A. Z. Bendimerad, E. Roziere, and A. Loukili, "Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates," *Mater Struct*, vol. 48, no. 11, pp. 3557–3569, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0421-5.

[47] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review," Jul. 30, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

[48] H. Panghal and A. Kumar, “Examining the structural viability of recycled fine aggregates in sustainable concrete,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 2931–2942, Jun. 2024, doi: 10.1007/s12206-024-0513-2.

[49] A. Hasheminezhad, D. King, H. Ceylan, and S. Kim, “Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: A review,” Nov. 10, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175310.

[50] Z. ZHAO, L. COURARD, S. GROSLAMBERT, T. JEHIN, A. LÉONARD, and J. XIAO, “Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 157, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104786.