UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sustitución de agregados convencionales por agregados provenientes del reciclaje de vidrio, para mezclas de concreto simple

Jesús David Velásquez Builes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción
Medellín, Colombia
2025

Sustitución de agregados convencionales por agregados provenientes del reciclaje de vidrio, para mezclas de concreto simple

Jesús David Velásquez Builes

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Construcción

Director:
Carlos Mauricio Bedoya Montoya
Dr.

Línea de Investigación:
Construcción Sostenible
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en Construcción (GICONS)
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción
Medellín, Colombia
2025

Dedicatoria

Dedico esta tesis con el más profundo amor y respeto a la memoria de mis padres.

Agradecimientos

Al profesor Carlos Mauricio Bedoya, por el acompañamiento en este largo proceso.

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por ser un espacio de conocimiento, en el cual me he podido encontrar y reconocerme en mi mejor versión como persona.

A mis Hermanos, que sienten como suyo este proceso.

Resumen

Sustitución de agregados convencionales por agregados provenientes del reciclaje de vidrio, para mezclas de concreto simples

Esta investigación se centra en el desarrollo de una tecnología de origen social con el fin de crear un material ecológico y sostenible como respuesta a la problemática de la baja calidad, el elevado costo y el impacto ambiental que genera la extracción de agregados para concreto en la ciudad de Leticia (Colombia).

El objetivo principal es establecer los parámetros técnicos y tecnológicos para el uso del vidrio como sustituto parcial del agregado fino empleado en la elaboración de concretos simples.

La investigación se basa en los parámetros de la construcción sostenible, específicamente en el uso y desarrollo de eco-materiales, el aprovechamiento de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD)[1] y la implementación de una tecnología de orden social.

Se busca contribuir al manejo y disposición de los RSD, especialmente en lo relacionados con los recipientes de vidrio, los cuales representan un porcentaje considerable de los residuos sólidos en la ciudad. Estos no pueden ser llevados a las ciudades donde podrían ser reaprovechados y/o reciclados por la falta de vías y terminan como desecho, generando un problema de contaminación considerable.

La investigación también explora tangencialmente la posible relación que existente entre la extracción de agregados comercializados en la ciudad y la minería ilegal de oro.

El departamento de Amazonas (Colombia) no posee títulos y/o concesiones mineras para la extracción de agregados, por lo que este mercado es abastecido por

[1] RSD, Residuos sólidos domésticos

comerciantes de los países vecinos, en los que se ha evidenciado la creciente de minería ilegal.

Palabras clave: Tecnología social, Ecomaterial, construcción sostenible, concreto simple, vidrio, Amazonas, Economía Circular.

Abstract

Substituting Conventional Aggregates with Recycled Glass in Concrete Mixtures

This research focuses on the development of a technology of social origin in order to create an ecological and sustainable material in response to the problem of low quality, high cost and environmental impact generated by the extraction of aggregates for concrete in the city of Leticia (Colombia).

The main objective is to establish the technical and technological parameters for the use of glass as a partial substitute for fine aggregate used in the production of simple concrete.

The research is based on the parameters of sustainable construction, specifically in the use and development of eco-materials, the use of Solid Domestic Waste (SDW) and the implementation of a social technology.

The aim is to contribute to the management and disposal of SDW, especially in relation to glass containers, which represent a considerable percentage of solid waste in the city. These cannot be taken to the cities where they could be reused and/or recycled due to the lack of roads and end up as waste, generating a considerable contamination problem.

The research also explores tangentially the possible relationship between the extraction of aggregates traded in the city and illegal gold mining.

The department of Amazonas (Colombia) does not have mining titles and/or concessions for the extraction of aggregates, so this market is supplied by traders from neighboring countries, where illegal mining is on the rise.

Keywords: Social technology, Ecological material, Aggregates, Solid Domestic Waste (SDW), Sustainable construction, Simple concrete, Glass.

Contenido

Introducción **17**

Antecedentes (Estado del Arte) **21**

Capítulo 1. ..... **21**

Materiales y potencial **21**

1.1 Concreto simple 21

1.1.1 Cemento 21

1.1.2 Clasificación de los cementos 22

1.1.3 Agregados para el concreto 22

1.1.3.1. Agregados gruesos 23

1.1.3.2. Agregado fino 24

1.1.3.3. Agregados artificiales para el concreto 24

1.1.3.4. Agregados marginales 25

1.1.4 El vidrio 26

1.1.5 Arena de vidrio 26

1.1.6 Caracterización del vidrio como agregado artificial 29

Capítulo 2. ..... **33**

Confección muestras **33**

2.1. Metodología 33

2.1.1. Hipótesis 37

2.1.2. Población y muestra 38

2.1.3. Definición de las muestra o especímenes 38

2.1.4. Variables 39

2.1.5. Instrumentos de investigación 40

2.1.6. Análisis de los datos 40

2.1.7. Resultados obtenidos 41

2.1.8. Resultados 42

2.1.8.1. Caracterización del agregado provenientes del reciclaje de vidrio (AVR) 42

2.1.8.2. Análisis de la curva granulométrica del AVR según criterios de la Norma NTC 77 42

2.1.8.3. Material que pasa el tamiz 75 µm (malla 200) en AVR según criterios de la norma NTC 78 44

2.1.8.4. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en AVR según criterios de la NTC 92 44

2.1.8.5. Solidez (sanidad) del AVR mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio según criterios de la NTC 126 45

2.1.8.6. Densidad y la absorción del AVR bajo criterios de la norma NTC 237 47

2.1.8.7. Análisis comparativo y correlacionado entre agregados finos y AVR 48

2.1.9. Desempeño del CVR al esfuerzo de compresión 49

2.1.10. Resultados de densidad y velocidad de pulso ultrasónico PVU del concreto

con AVR 52

2.1.11. Análisis descriptivo de micrografías estereoscópicas del concreto con AVR 55

Capítulo 3. 63

Contexto ambiental del nuevo material 63

3.1. El vidrio desde la perspectiva del residuo 67

3.2. Marco normativo y regulatorio para la implementación del uso de vidrio como agregado artificial en el concreto 69

3.3. Implicaciones económicas del uso del concreto con agregados de vidrio reciclado 71

3.4. Análisis de costo de producción de 1 m^3 de agregado artificial a partir del aprovechamiento de vidrio (AVR) 72

3.5. Análisis general de factibilidad general del concreto con (AVR) 74

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones 77

4.1. Recomendaciones 78

4.2. Propuestas de futuras investigaciones 79

Bibliografía 80

Lista de figuras

Figura 1.1. 29

Diagrama proceso de beneficio del vidrio para su uso como agregado sustituto en mezclas de concreto simple 29

Figura 1.2: Proceso de transformación de vidrio a agregado para concreto (AVR) 32

Figura 2.1. Representación de diseño de probetas para ensayos 38

Figura 2.2. Esquemas de fracturas típicas en cilindros en ensayos a compresión (Fuente: ICONTEC, NTC 673, 2021) 52

Fotografía 2.12. Ensayo de VPU 54

Figura 3.1. Mapa de Google con la ubicación de Leticia, Colombia Agencia Nacional de Minería. (s.f.). Visor SIGM – Sistema de Información Geográfica Minero [Mapa interactivo]. Agencia Nacional de Minería. https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt **..... 65**

Lista de gráficas

Gráfica 2.1. Análisis granulométrico arena de vidrio 43

Gráfica 2.2. Curva de resistencia a compresión a 56 días 50

Gráfica 3.1. Análisis comparativo costo de producción de 1m^3 de concreto simple Vs concretos con diferentes % de sustitución 73

Gráfica 3.2. Análisis comparativo general 75

Lista de fotografías

Fotografía 0.1: Residuos de vidrio en Leticia 18

Fotografía 0.2: Proyecto Glass Build Lives en San Andrés 19

Fotografía 0.3. AVR 20

Fotografía 1.1: Selección de vidrio 27

Fotografía 1.2: Partícula VAR 28

Fotografías 2.1. y 2.2. Proceso de elaboración mezcla concreto con AVR 36

Fotografías 2.3., 2.4. y 2.5. Proceso de elaboración de probetas de concreto 36

Fotografías 2.6, 2.7. y 2.8. Control de asentamiento o slump mediante el cono de Bedoya 36

Fotografías 2.9, 2.10 y 2.11. Proceso de vibrado y curado de probetas de concreto con AVR 37

Fotografía 2.13. Lectura VPU 54

Fotografía 2.14. Lectura VPU 55

Fotografía 2.13. AVR vista general 56

Fotografía 2.14. Dimensiones en mm de AVR 56

Fotografía 2.15. Vista general de AVR 57

Fotografía 2.16. Micrografías estereoscópicas del concreto convencional MP 57

Fotografía 2.17. Micrografía estereoscópica del concreto convencional (MP) 57

Fotografía 2.18. Micrografía estereoscópica del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR 58

Fotografía 2.19. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR.....58

Fotografía 2.20. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR.....59

Fotografía 2.21. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% de agregado convencional por AVR.....59

Fotografía 2.22. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% AVR.....60

Fotografía 2.23. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% AVR.....60

Fotografía 2.24. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% de agregado convencional por AVR.....61

Fotografía 2.25. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% AVR.....61

Fotografía 2.26. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% AVR.....62

Lista de tablas

Tabla 2.1 34

Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa 34

Tabla 2.2 34

Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 10% de sustitución de agregado fino 34

Tabla 2.3 35

Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 25% de sustitución de agregado fino 35

Tabla 2.4 35

Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 35% de sustitución de agregado fino 35

Tabla 2.5 43

Análisis granulométrico arena de vidrio 43

Tabla 2.6 44

Análisis ensayo de material que pasa tamiz 0.075 mm 44

Tabla 2.7 45

Análisis de densidad aparente del AVR 45

Tabla 2.8 46

Solidez del AVR 46

Tabla 2.9. 47

Ensayo de densidad y absorción del AVR 47

Tabla 2.10. Análisis comparativo entre agregados finos según Norma NTC 174 49

Tabla 2.11 50

Resultados de ensayo de compresión a 56 días 50

Tabla 2.12 53

Resultados de densidad y velocidad de pulso ultrasónico PVU 53

Tabla 2.13. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica.....53

Tabla 3.1. 69

Caracterización de residuos sólidos en Leticia % tonelada.....69

Tabla 3.2. 72

Análisis de precio unitario para la elaboración de 1 m^3 de arena de vidrio AVR 72

Tabla 3.3. 73

Análisis comparativo costo de producción de 1m^3 de concreto simple Vs concretos con diferentes % de sustitución.....73

Tabla 3.4. 74

Análisis comparativo general 74

Lista de símbolos y abreviaturas

- **RSD** (Residuos Sólidos Domiciliarios): Residuos sólidos más abundantes en la ciudad de Leticia, resultantes del posconsumo de bebidas y diversos productos. Equivalente a "Solid Domestic Waste (SDW)" en inglés.

- **GICONS** (Grupo de Investigación en Construcción): Grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia.

- **AVR** (Agregado de Vidrio Reciclado): Vidrio proveniente del reciclaje de botellas utilizado como sustituto de agregados convencionales en mezclas de concreto simple.

- **CVR** (Concreto simple con Agregados de Vidrio Reciclado): Concreto que incorpora agregados de vidrio reciclado como sustituto parcial de los agregados convencionales.

- **ASTM** (American Society for Testing and Materials): Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, una asociación con alcance internacional que establece normas, reglamentos y leyes.

- **ACI** (American Concrete Institute): Instituto Americano del Concreto.

- **NTC** (Norma Técnica Colombiana): Norma técnica que establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos en concreto. Se menciona específicamente la NTC 174.

- **VPU** (Velocidad de Pulso Ultrasónico): Ensayo de laboratorio realizado al concreto endurecido para determinar su densidad y calidad, correlacionado con la resistencia a la compresión.

- **ONAC** (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia): Organismo que otorga certificaciones y cumple criterios de calibración y aseguramiento metrológico.

- **DPN** (Departamento Nacional de Planeación): Entidad mencionada en relación con los datos de generación de residuos en Leticia.

- **DANE** (Departamento Administrativo Nacional de Estadística): Entidad mencionada en relación con los datos de población de Leticia.
- **ACV** (Análisis de Ciclo de Vida): Metodología para medir el impacto ambiental del concreto con AVR en comparación con el concreto convencional.

- **RCD** (Residuos de Construcción y Demolición): Residuos cuya gestión integral está regulada por la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Lista de Palabras de Relevancia

- **Agregados Convencionales**: Materiales como arena y grava utilizados tradicionalmente en la fabricación de concreto.

- **Concreto Simple** (o Hormigón): Material heterogéneo compuesto por una parte cementante (cemento y agua) y otra de relleno (agregados), con baja a moderada resistencia a la compresión y baja resistencia a la tracción.

- **Reciclaje de Vidrio**: Proceso de aprovechamiento de vidrio posconsumo para transformarlo en agregado artificial.

- **Construcción Sostenible**: Enfoque de construcción que busca el uso y desarrollo de eco-materiales, el aprovechamiento de residuos y la implementación de tecnologías de orden social.

- **Eco material / Material Ecológico**: Material que contribuye a la construcción sostenible y a la reducción del impacto ambiental.

- **Economía Circular**: Modelo económico que promueve el reciclaje y la reutilización de materiales y residuos, reduciendo la presión sobre los recursos naturales no renovables.

- **Agregado Fino**: Arena natural, arena manufacturada o una combinación de ellas, que pasa el tamiz normalizado 9.5 mm y queda retenido en el tamiz normalizado 75 µm. Su función principal es llenar los vacíos entre los agregados gruesos.

- **Agregado Grueso**: Agregado clasificado por su gradación, con partículas mayores que 4.75 mm, comúnmente conocido como piedra. Su función principal es rellenar el volumen de la mezcla.

- **Agregados Artificiales**: Materiales granulares con características similares a los agregados naturales, obtenidos por procesos industriales o aprovechamiento de subproductos.

- **Clinker**: Componente principal del cemento, finamente molido, producido por la cocción a altas temperaturas de mezclas que contienen cal, alúmina, hierro y sílice.

- **Durabilidad**: Capacidad del concreto de resistir sin deterioros significativos a las acciones físicas, químicas y mecánicas a las que estará sometido durante su vida útil.

- **Trabajabilidad:** Propiedad del concreto que le permite moverse con facilidad, llenando moldes o formaletas. Mejora con la adición de agregado fino.

- **Resistencia a la Compresión**: Capacidad del concreto para soportar cargas de compresión. Es la variable más representativa del desempeño del concreto.

- **Resistencia a la Tracción**: Capacidad del concreto para soportar cargas axiales.

- **Módulo de Finura**: Indicador de la finura de un agregado.
- **Densidad**: Factor determinante en la calidad del concreto, donde un concreto más denso implica menos poros y una mejor compactación.
- **Absorción**: Porcentaje de agua que puede absorber un agregado.
- **Curva Granulométrica**: Distribución del tamaño de las partículas de un agregado.
- **Micrografías Estereoscópicas**: Imágenes detalladas que muestran la morfología de las partículas y la interacción entre los componentes del concreto.
- **Carbonatación:** Proceso químico que puede afectar la durabilidad del concreto.
- **Minería Ilegal de Oro**: Actividad ilegal mencionada en relación con la extracción de agregados en el departamento de Amazonas.

Símbolos con Letras Latinas y/o Notación Matemática Común:

f'c: Resistencia a la compresión del concreto. Este es un símbolo estándar en ingeniería civil para indicar la resistencia característica del concreto.

%: Porcentaje (utilizado para indicar la sustitución de agregados, la generación de residuos, etc.)

mm: Milímetros (unidad de medida para tamaños de partículas, asentamiento del cono, etc.).

kg: Kilogramos (unidad de masa).

m^3: Metros cúbicos (unidad de volumen).

MPa: Megapascales (unidad de presión o tensión, utilizada para la resistencia a la compresión).

psi: Libras por pulgada cuadrada (unidad de presión o tensión).

±: Más/menos (utilizado para indicar un rango o una tolerancia).

°C: Grados Celsius (unidad de temperatura).

VPU: Velocidad (en el contexto de Velocidad de Pulso Ultrasónico, VPU).

pH: Medida de acidez o alcalinidad.

≤: Menor o igual que (utilizado en especificaciones de normas).

>: Mayor que (utilizado en especificaciones de normas).

Introducción

Después de varios años de ejercicio profesional como arquitecto constructor, me surgieron inquietudes en referencia el alto costo de los agregados y, por consecuencia, del concreto. También sobre las dificultades para acceder a agregados y concretos de buena calidad, especialmente en la ciudad de Leticia (departamento del Amazonas, Colombia), pues tenía dificultades para cumplir un mínimo normativo. A partir de estas inquietudes, desarrollé una serie de iniciativas encaminadas a mejorar la calidad de los concretos y reducir sus costos. Los ejercicios realizados concluían la necesidad de mejorar la forma y granulometría, además de reducir los contenidos de materia orgánica de los agregados que se comercializan en la región.

Surgió así la posibilidad de usar uno de los residuos sólidos domiciliarios (RSD) más abundantes en la ciudad: el vidrio, resultante del posconsumo de bebidas y diversos productos. Identifiqué que en la región existe una práctica común, por parte de los recicladores, triturar manualmente estos envases y emplearlos, a manera de un "cascajo", en la elaboración de concretos simples con el fin de reducir los costos.

Si bien no se cuenta con registros o datos que determinen el origen exacto de esta práctica, se estima que el uso de vidrio como agregado en concretos se remonta a mediados de la década de 1970.

Una anécdota popular narrada por algunos ciudadanos mayores en la ciudad cuenta que los cimientos de la fábrica más grande de bebidas gaseosas de la región fueron construidos con los envases rotos de su principal competidor para la época, lo que ilustra la temprana adopción y arraigo de esta técnica.

Fotografía 0.1: Residuos de vidrio en Leticia. Fuente: Elaboración Propia.

Para el año 2009, como miembro activo de la Asociación de Recicladores del Amazonas (A-reciclar), se buscó el apoyo de la Fundación Bavaria, con el propósito de potenciar esta práctica. Iniciativa que buscaba tecnificar el proceso de aprovechamiento del vidrio como agregado del concreto, con diversos usos y aplicaciones, alineándose con las políticas de manejo de residuos posconsumo de la empresa en la región.

En el año 2017, la Fundación Bavaria, en colaboración con Peldar, la Corporación Autónoma Regional Coralina y la Cancillería de Colombia me extienden la invitación para replicar la iniciativa en la Isla de San Andrés con el objetivo de alcanzar estándares de productividad más altos.

Ambos proyectos recibieron, en su momento, reconocimientos a nivel nacional e internacional por su contribución a la sostenibilidad. El Centro Mexicano para la Filantropía, la Alianza por la Responsabilidad Social en México y Fórum Empresa galardonaron las iniciativas en el Amazonas en el año 2011, mientras que el proyecto Glass Build Lives, en la isla de San Andrés, lo recibió en el año 2017. Reconociéndolas como las mejores prácticas de responsabilidad social empresarial de Latinoamérica.

Fotografía 0.2: Proyecto Glass Build Lives en San Andrés

Fuente: Elaboración propia.

La experiencia previa acumulada me llevó a formular la presente investigación, con el objetivo de profundizar en el conocimiento de este material, basado en los principios de la construcción sostenible y la implementación de una tecnológica que contempla las buenas prácticas en el sector de la construcción, el desarrollo de un material con un alto grado de innovación y el desarrollo tecnológico, desde la región y para la región.

El contexto de esta investigación se divide en dos ámbitos: el primero relacionado con su pertinencia desde lo técnico y el segundo, con factores ambientales, socioeconómicos y culturales de Leticia, aunque puede ser pertinente y aplicable en zonas o regiones con condiciones o problemáticas similares.

Es importante resaltar que los agregados convencionales utilizados en la ciudad de Leticia, provienen de la extracción de material de arrastre o aluvión en algunos ríos afluentes del Amazonas, como lo son el río Japurá (nombre que recibe el río Caquetá en Brasil) y el río Yavarí, localizado en los límites entre Perú y Brasil. Dada esta procedencia, estos agregados presentan altas concentraciones de materia orgánica con unos tamaños de partículas muy finas, producto de la erosión y el arrastre de estos ríos.

Las arenas y las gravas, por su parte, están conformadas por cantos rodados de aristas muy redondeadas y paredes extremadamente lisas, con tamaño de partículas muy homogéneas, lo que afecta sustancialmente la calidad de los concretos.(Guillen Flores & Llerena Tinoco, 2020)

Fotografía 0.3. AVR

Fuente: Elaboración propia.

La investigación se desarrolla en tres capítulos. En el primero, materiales y potencial, se analiza, desde las normas técnicas, las características del material propuesto, describiendo los ensayos realizados para este fin; además, se presenta un proceso de beneficio o trasformación de los envases o recipientes de vidrio en un agregado artificial apto para su uso en la confección de concretos.

En el capítulo dos, confección de muestras, se presenta el proceso de desarrollo de los ensayos realizados, la metodología que determinó la factibilidad del uso del AVR y se presentan los resultados con sus respectivos análisis. Por último, en el tercer capítulo, el contexto del nuevo material, se presentan las implicaciones ambientales del uso del concreto con AVR, sus implicaciones económicas y los aspectos normativos más relevantes.

Por último, se dan las conclusiones y recomendaciones derivadas del proceso de investigación y se hace referencia a las posibles investigaciones que se deriven de esta.

ANTECEDENTES (Estado del Arte)

Hoy el uso de materiales de reciclaje en la industria de la construcción se enmarca en la búsqueda de la economía circular y de la sostenibilidad, pero; la idea de emplear materiales recuperados para elaborar concreto es una práctica ancestral, nacida del ingenio y la necesidad.

La historia está repleta de estos ejemplos de superposición: los romanos construyendo sobre cimientos griegos, el poder español erigiéndose sobre las ruinas de los imperios azteca e inca, y la misma Roma imperial sirviendo como cantera para las catedrales de la Europa medieval.

No obstante, la idea o concepto de aprovechamiento de residuos con fines ambientales y económicos en la industria de con construcción tiene como génesis la Europa posterior a la Segunda Guerra Mundial donde esta idea se transformó en una estrategia a gran escala. La necesidad de reconstruir forzó un cambio de perspectiva: los escombros dejaron de ser desechos para convertirse en un valioso banco de materiales, sentando así el precedente moderno para el uso de reciclados como un pilar fundamental de la construcción sostenible y la resiliencia ante la adversidad en algunas comunidades. Sobre este evento en particular podemos acudir al video “MUJERES DE LOS ESCOMBROS - UN DÍA EN…." de History Latinoamérica. (2023, 28 de noviembre). MUJERES DE LOS ESCOMBROS - UN DÍA EN... [Video]. YouTube. http://www.youtube.com/watch?v=FT58LLpzKhM

Bajo la premisa de la sostenibilidad y las economías circulares el vidrio como residuo sólido doméstico (RSD) su uso y/o aplicación como sustituto al agregado fino tiene como antecedentes las investigaciones:

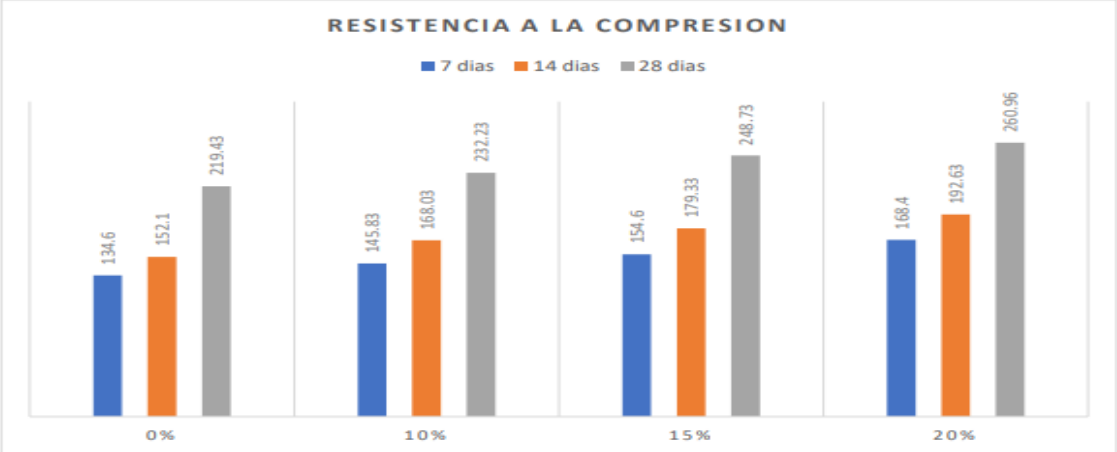
En el trabajo de grado presentado para la Universidad Católica de Colombia Hernández Doria y Rojas Montañez (2021), realizaron un trabajo donde se analiza el comportamiento de la resistencia a compresión a los 28 días del concreto al sustituir parcialmente el agregado fino por vidrio molido reciclado. La investigación se centró en un concreto con una resistencia de diseño de 21 MPa, y se evaluaron porcentajes de sustitución en peso del 0% (muestra patrón), 4%, 5% y 6%. Para este fin se caracterizaron los agregados, el cemento y el vidrio molido (AVR) y se elaboraron especímenes (probetas) para comprobar

la resistencia obtenida a 28 días, y cuyos resultados demostraron que la sustitución del 6% de vidrio molido alcanzó la mayor resistencia a la compresión, con un valor de 23,07 MPa. Esto representó un incremento del 6,5% en comparación con la resistencia de la muestra patrón (21,66 MPa). La muestra con un 5% de sustitución también superó a la mezcla patrón, mientras que la del 4% registró una resistencia ligeramente inferior a la de la muestra sin modificar a los 28 días.(Hernández Doria E & Rojas Montañez J, 2021)

Otra investigación de referencia es Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. Á., & Zamora Mondragón, J. E. (2022). Denominada “Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. Publicada en la Revista Universidad y Sociedad, 14(1), 179-192. Donde se evaluó el uso del vidrio reciclado bajo dos escenarios distintos, la sustitución del agregado fino y la sustitución del cemento, y a partir de 50 probetas de concreto evaluaron el desempeño de la resistencia a compresión a los 28 días. En el primer escenario, se reemplazó el agregado por vidrio particulado en porcentajes del 25% y 50%. En el segundo, se sustituyó el cemento por polvo de vidrio (molido a un tamaño de partícula de 74 µm) en los mismos porcentajes, a partir de esta experiencia los autores concluyeron que el uso del vidrio es un sustituto idóneo tanto para el agregado como para el cemento, basándose en que la sustitución del 25% del agregado fino por vidrio reciclado arrojo un aumento de la resistencia compresión a los 28 días de un 8%, mientras que al sustituir el 25% del cemento por vidrio reciclado pulverizado se logró un incremento del 22.5% (Segura Terrones et al., 2022)

En la Universidad Cesar Vallejo de la Ciudad de Trujillo Perú, se desarrolló una investigación enfocada a sustituir parcialmente el uso del cemento, Abanto Rodríguez y Gil Dilas (2022) investigaron el efecto de la adición de vidrio molido para incrementar la resistencia a la compresión de un concreto Portland con una resistencia de diseño de f'c= 210 kg/cm² a los 28 días, en esta iniciativa se buscaba la sustitución del 10%, 15% y 20% del peso total de cemento; los resultados mostraron que a medida que se aumenta el % de vidrio, se incrementa la resistencia a los 28 días, la mezcla con 10% alcanzó 232.23 kg/cm², la de 15% llegó a 248.73 kg/cm², y la de 20% obtuvo el mejor desempeño con 260.96 kg/cm². Este último valor superó en un 18.9% (calculado a partir de los promedios) a la resistencia de la mezcla patrón, que fue de 219.43 kg/cm², resultados contenidos en la imagen siguiente:

Figura 27: *resultados para establecer la influencia*



Fuente: (Dilas et al., 2022)

Nota. La gráfica de barras ilustra la resistencia promedio a la compresión (en kg/cm²) obtenida para el concreto patrón (0%) y para las mezclas con adición de 10%, 15% y 20% de vidrio molido.

En la Revista Gaceta Técnica. Artículo de Investigación. 25(2), 74-89, julio-diciembre, 2024, Bedriñana Garamendi y Yoctun Ríos, presentaron una investigación en el cual estudiaron la influencia de la sustitución parcial del agregado fino por vidrio reciclado (VR) en las propiedades mecánicas de un concreto autocompactante en Ayacucho, Perú. El estudio comparó una muestra patrón o de referencia con mezclas que contenían un 7.5%, 15%, 22.5% y 30% de vidrio reciclado como reemplazo del agregado fino, Los resultados indicaron que la dosificación más prometedora fue la del 15% de sustitución, la cual generó los mayores incrementos en todas las propiedades mecánicas evaluadas: la resistencia a compresión aumentó en un 13.01%, la resistencia a tracción en un 17.75% y la resistencia a flexión en un 27.87%. Adicionalmente, se evaluó la durabilidad mediante la exposición a sulfato de magnesio, concluyendo que las mezclas con hasta un 22.5% de VR cumplieron con el parámetro de la norma (ser menor al 15%), mientras que la sustitución del 30% no lo hizo. Finalmente, por tanto, se estima que el reemplazo del 15% de agregado fino por vidrio reciclado es una alternativa viable que mejora significativamente el desempeño del concreto autocompactante.

Capítulo 1. Materiales y potencial

1.1 Concreto simple

“El concreto simple, también conocido como hormigón, es un material “heterogéneo compuesto por una parte cementante (cemento y agua) y otra, que podemos considerar de relleno (agregados), pero que mejoran notablemente las características del material. Recién preparado tiene un aspecto fluido y viscoso, propiedad que le permite moverse con facilidad llenado los moldes o formaleta” (García Moreno, 1987, p. 16). Se caracteriza por su baja a moderada resistencia a la compresión y su baja resistencia a la tracción.

Cuando se embebe en el concreto simple una armadura de metal, de tal manera que ambos materiales actúen juntos para resistir las fuerzas, recibe el nombre de concreto reforzado y/u hormigón armado. La función principal del concreto es resistir los esfuerzos de compresión y la de la armadura metálica, soportar los esfuerzos de tracción.

1.1.1 Cemento

Según (Castillo, 2009) (p. 15), el cemento es un producto comercial de fácil adquisición, que cuando se mezcla con agua, ya sea solo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de reaccionar lentamente con el agua hasta formar una masa endurecida, esencialmente es un *Clinker* finamente molido, producido por la cocción a altas temperaturas de mezclas que contienen cal, alúmina, hierro y sílice en proporciones determinadas, bajo este contexto se conocen como cementos a base Portland o cemento Portland.

En el sentido más amplio, la palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas

(Sánchez de Guzmán, 2001, p. 27). Es importante aclarar que esta definición abarca una amplia variedad de materiales, entre los cuales se destacan a parte de los cementantes, las cales, los asfaltos y alquitranes.

1.1.2 Clasificación de los cementos

Según el Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC) (2014, p. 3), en su tercera actualización, en la que se especifica el desempeño para el cemento hidráulico en Colombia, para el general y los usos especiales, se involucran parámetros de durabilidad y, por tanto, los clasifica de la siguiente manera:

- **Cemento tipo UG**: Cemento hidráulico para construcción general o cuando no se requieren los cementos de usos especiales.
- **Cemento tipo ART**: Cementos de alta resistencia temprana.
- **Cemento tipo MRS**: Cementos de moderada resistencia a sulfatos.
- **Cemento tipo ARS:** Cementos de alta resistencia a sulfatos.
- **Cemento tipo MCH:** Cemento de moderado calor de hidratación.
- **Cemento tipo BCH:** Cemento de bajo calor de hidratación.

Como subclasificación adicional, aplicable a las anteriores, se presentan dos opciones, cuya designación de letra y titulo deberán seguir inmediatamente después de la respectiva clasificación principal (por ejemplo, Tipo ART (BRA)).

- **Opción BRA:** Baja Reactividad con Agregados Reactivos Alcali-Silice, cuando los ensayos de agregados definen el potencial reactivo de los agregados.
- **Opción A:** Cemento con incorporadores de aire.

1.1.3 Agregados para el concreto

“Son elementos que forman parte importante del concreto, conformados por partículas que pueden ser de origen natural o artificial, cuyas características afectan directamente el producto resultante de esta mezcla para la obtención de las propiedades requeridas” (Padilla et al., 2019, p. 10).

En síntesis, los agregados para concreto obedecen a un gran número de variables que pueden definir su clasificación; como lo son origen, color, tamaño de partículas, peso de

partículas, entre otras. La clasificación más común los define en finos y gruesos, hay que destacar la influencia de asociaciones (como por ejemplo ASTM[2] o A[3]CI) que tienen un alcance internacional y son adoptadas para el establecimiento de normas, reglamentos y leyes de varios países, incluido Colombia.

Dentro de nuestro campo de estudio se tiene la Norma Técnica Colombiana NTC 174: "Especificaciones de los Agregados para Concretos", que establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos (excepto los agregados livianos y pesados), para uso en concreto. A continuación, presentamos algunas definiciones de los agregados de relevancia para la investigación.

1.1.3.1. Agregados gruesos

"Agregado clasificado por su gradación que viene a ser distribución volumétrica de sus partículas la cual es conocida comercialmente como piedra, debido a que sus partículas son mayores que 4.75 mm es decir son retenidas en la Malla Estándar ASTM #4" (Padilla et al., 2019, p. 11).

El más común es la grava natural o triturada a partir de rocas como granito, basalto o caliza. También se pueden utilizar materiales reciclados como concreto triturado o escoria de acero.

Se considera que la función principal que desempeña es la de rellenar el volumen de la mezcla, reduciendo la cantidad de pasta de cemento requerida, optimizando los costos de su fabricación, también aporta en la trabajabilidad de la mezcla, facilitando el manejo y la colocación del concreto en estado fresco, también reduce la fisuración controlando la contracción del concreto en estado endurecido, aumentando su durabilidad y resistencia a la compresión ya que este contribuye significativamente a la capacidad del concreto de soportar cargas.

---

[2] **ASTM** corresponde siglas de **American Society for Testing and Materials**, que en español se traduce como Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
[3] **ACI**, corresponde a las siglas de **American Concrete Institute** (Instituto Americano del concreto)

1.1.3.2. Agregado fino

Según Paredez Benzu (2019, p. 19), el agregado fino consiste en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ellas, que pasa el tamiz normalizado 9.5 mm (3/8 pulg) y queda retenido en el tamiz normalizado 75 µm (N° 200). Además, deberá cumplir con los límites establecidos en la norma ASTM C33 o su equivalente NTC 174. Dentro de las arenas naturales la más abundante y usada es la arena silícea o calacea.

El agregado fino natural o triturado, por lo general, proviene de la meteorización de la sílice o caliza, también se pueden emplear materiales como cenizas volantes o puzolana. Su función principal es llenar los vacíos entre los agregados gruesos, creando una mezcla más densa y compacta. Por otra parte, mejora la trabajabilidad, aumentando la plasticidad y facilidad de moldeo del concreto fresco, aumentando la resistencia a la compresión y contribuyendo a acrecentar la capacidad del concreto de soportar cargas. Además, aumenta la resistencia a la tracción, incrementando la capacidad del concreto de soportar cargas axiales.

En síntesis, los agregados son elementos indispensables del concreto dado que aportan:

- **Economía:** Reducen el costo del material al disminuir la cantidad de pasta de cemento requerida.
- **Trabajabilidad**: Aportan en el manejo y la colocación del concreto fresco.
- **Durabilidad:** Reducen la fisuración y aumentan la resistencia al paso del tiempo.
- **Resistencia:** Mejoran la capacidad del concreto para soportar cargas de compresión y tracción.

1.1.3.3. Agregados artificiales para el concreto

Los agregados artificiales son materiales granulares con características similares a los agregados naturales (finos y gruesos) que, a diferencia de los agregados naturales, no se extraen directamente de ríos o canteras, sino que son obtenidos por procesos industriales o por el aprovechamiento de subproductos de diversas industrias. Dentro de

estos podemos encontrar arcillas expandidas, escorias de alto horno, materiales de construcción reciclados, y vidrio reciclado, entre otros tantos.

Dentro del grupo de agregados artificiales se hará énfasis en la siguiente subclasificación de relevancia para esta investigación.

1.1.3.4. Agregados marginales

En el documento de tesis denominado “Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento”, se definen los agregados marginales como aquellos materiales que no cumplen con al menos uno de los requerimientos técnicos, en términos de las propiedades y características definidas para materiales convencionales, según lo establecido en la normatividad aplicable en cada país (Galves Galvis, 2022).

Por tanto, los agregados marginales pueden ser utilizados en algunas aplicaciones específicas, siempre y cuando se realicen estudios y análisis previos que corroboren la viabilidad, y se tomen precauciones para garantizar la calidad y el desempeño de los concretos. Bajo este orden de ideas, los agregados marginales se pueden emplear en circunstancias donde no se requieran altas resistencias, aplicaciones no estructurales, estabilizaciones para suelos o llenos, siempre y cuando se tengan algunas consideraciones, como:

- **Evaluación previa y/o caracterización**: Es fundamental realizar estudios y análisis detallados de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados marginales antes de su uso.
- **Diseño de mezclas:** Se deben diseñar las mezclas de concreto, con el fin de compensar las deficiencias detectadas en los agregados marginales.
- **Pruebas de laboratorio:** Se requiere la realización de pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño de los concretos elaborados con agregados marginales.
- **Monitoreo y control de calidad:** Se requiere un monitoreo y control de calidad estricto durante todo el proceso de producción y colocación del concreto, con el fin de constatar su desempeño.

En conclusión, los agregados artificiales y los marginales pueden ser una alternativa viable para ciertas aplicaciones, siempre y cuando se empleen de manera responsable y con un conocimiento profundo de sus propiedades y limitaciones. Su uso adecuado puede contribuir a la reducción de costos, la reutilización de materiales y la disminución del impacto ambiental en la industria de la construcción.

1.1.4 El vidrio

En referencia a lo enunciado por Padilla et al. (2019, p. 11), es un material cuyo componente principal es la sílice proveniente de arena, pedernal o cuarzo. Es de apariencia dura, frágil y generalmente transparente. Aunque se comporta como un sólido, es un fluido de muy alta viscosidad. Está compuesto por una mezcla de óxidos metálicos, siendo su componente principal el óxido de sílice, conocido como silicio ($SiO4$). Si bien a simple vista pareciera ser muy similar a un cristal, la diferencia con este radica en el ordenamiento que tienen las moléculas que lo componen, donde los enlaces Si-O están distribuidos de manera irregular, sin un patrón determinado, siendo por definición, un material amorfo.

El vidrio normal es incoloro, pero gracias a su versatilidad permite la incorporación de diversos componentes para obtener una amplia gama de colores, por ejemplo: El óxido de hierro lo tiñe de verde o azul, el óxido cuproso de azul claro, el óxido de cobalto de azul intenso y el óxido crómico de amarillo verdoso, y para decolorarlo, se utilizan elementos como el selenio, los óxidos de níquel o cobalto, entre otros.

1.1.5 Arena de vidrio (A.V.R)

Para la reutilización de vidrio proveniente del reciclaje de botellas como agregado sustituto en la elaboración de concretos simples y basados en las experiencias previas a esta investigación, podemos determinar que se requiere un proceso de tratamiento previo que le otorgue características morfológicas similares a las del agregado fino convencional. Este proceso, denominado veneficio del vidrio de botellas, se describe a continuación:

- **Recepción y acopio de las botellas:** posterior a la recolección de las botellas de diversas fuentes, como puntos de reciclaje, restaurantes, bares, etc., se realiza una inspección visual para eliminar botellas de otro material y/o sucias o contaminadas con residuos peligrosos como aceites y químicos, entre otros. Luego, las botellas se almacenan en un lugar seco y protegido de la intemperie.

Fotografía 1.1: Selección de vidrio

Fuente: Elaboración propia.

- **Retiro de etiquetas y lavado**: Posteriormente, las botellas se lavan con agua a presión para eliminar suciedad y residuos externos, en un contenedor de agua con solución detergente. El objetivo de este proceso es desprender las etiquetas adheridas a las botellas, ya que los residuos de papel y los adhesivos utilizados pueden afectar negativamente la trabajabilidad, el fraguado y la resistencia final del concreto. Para la separación y retiro de estas etiquetas se emplea un sistema de separación por flotación o tamizado.
- Trituración primaria: Las botellas se introducen en un molino de impacto, comúnmente conocido como molino de martillos, el cual puede alimentarse manualmente o mediante sistemas mecánicos, es decir, bandas transportadoras o tolvas de alimentación. Los martillos giratorios del molino golpean el vidrio, rompiéndolo en fragmentos más pequeños. El tamaño de estos fragmentos

dependerá del espacio entre los martillos, de la velocidad de rotación del molino y las cribas o zarandas de salida.

Fotografía 1.2: Partícula VAR

Fuente: elaboración propia.

- **Clasificación granulométrica**: Posterior a la trituración primaria, el vidrio se tamiza para separar los fragmentos de acuerdo con su tamaño. Esto se puede realizar utilizando dos métodos:
  - **Trómel clasificador**: Es un cilindro rotatorio con orificios de diferentes tamaños en su superficie. El vidrio triturado se introduce en el trómel y, a medida que gira, los fragmentos más pequeños pasan por los orificios mientras que los más grandes quedan retenidos. De esta manera, se obtienen diferentes tamaños de vidrio.
  - **Zaranda vibratoria**: Emplea una malla o varias con orificios de tamaños específicos para separar los fragmentos de vidrio en diferentes tamaños. El vidrio triturado se coloca sobre la malla y, al vibrar, los fragmentos más pequeños pasan a través de los orificios, mientras que los más grandes quedan retenidos en la superficie, permitiendo separar el vidrio.

Es de resaltar que, dependiendo de los tamaños finales resultantes en cualquiera de los métodos antes señalados, se podrá optar por realizar un proceso de trituración secundaria para reducir los tamaños que no se enmarquen en los máximos de un agregado fino.

- **Acopio y/o almacenamiento**: El vidrio triturado y clasificado se almacena en silos, contenedores o nichos secos, protegidos de la intemperie, listos para su uso o despacho.

Es importante resaltar que, durante el proceso de trituración, se deben utilizar equipos de protección personal (como máscaras y gafas) adecuados para evitar lesiones por cortes con partículas de vidrio que puedan salir expedidas o por inhalación de polvo de vidrio.

El vidrio triturado debe almacenarse de manera segura para evitar su dispersión en el ambiente.

Figura 1.1. Diagrama proceso de beneficio del vidrio para su uso como agregado sustituto en mezclas de concreto simple.

1.1.6 Caracterización del vidrio como agregado artificial

Para la caracterización del agregado de vidrio reciclado (AVR), nos enmarcamos en lo establecido por la norma NTC 174 ("Especificaciones de los agregados para concreto"), la cual guarda equivalencia con la norma ASTM C 33. Se realizó una comparación a partir de los resultados obtenidos para el agregado fino.

Teniendo en cuenta lo especificado en la NTC 174, se realizaron los siguientes ensayos para determinar la caracterización de los agregados:

NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos

Esta norma abarca la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos, a través de un proceso de tamizado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), 2007, p. 6).
La importancia de este ensayo se basa en que permite clasificar los agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de los tamaños de las partículas que lo componen. Esta clasificación se hace mediante los porcentajes que retienen cada tamiz en peso y el resultado es la curva granulométrica que es esencial a la hora de diseñar mezclas de concreto hidráulico, la cual debe quedar en medio de dos intervalos establecidos por la norma.

NTC78: método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 µm en agregados minerales

El principal objetivo del ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 µm en agregados minerales es cuantificar la cantidad de partículas finas (arcillas y limos) presentes en la mezcla (Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC), 1995a).

Existen dos métodos principales para determinar el porcentaje de agregado fino (menor a 75 µm o tamiz N°200) en mezclas de hormigón:

- **Lavado con agua potable**: Este método, considerado el más simple, consiste en el lavado del material con agua potable a través de un conjunto de tamices de diferentes tamaños. El agua arrastra las partículas finas que pasan por el tamiz N°200, mientras que las partículas más gruesas quedan retenidas en los tamices superiores. La cantidad de material fino retenido en cada tamiz se expresa como un porcentaje del peso total del agregado original. Este método es adecuado para la mayoría de las aplicaciones, siempre que no haya arcillas o limos presentes en la mezcla.
- **Lavado con dispersante**: Debido a la presencia de arcillas o limos, la simple acción del agua no es suficiente para separar las partículas finas del material

más grueso. En estos casos, se utiliza un agente dispersante, llamado hexametafosfato de sodio, que ayuda a defloccular o disgregar las arcillas y limos, permitiendo que las partículas finas pasen a través del tamiz N°200. El proceso es similar al del lavado con agua potable, pero con la adición del dispersante a la solución de lavado. Este método proporciona resultados más precisos.

La elección del método de lavado depende de las características del agregado y de los requisitos específicos de la aplicación. Si no se especifica lo contrario, se recomienda utilizar el método de lavado con agua potable, ya que es más simple y económico. Sin embargo, si se sospecha la presencia de arcillas o limos, se debe utilizar el método de lavado con dispersante para obtener resultados más precisos.

NTC 92: Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en los agregados

Mediante este ensayo se determina la densidad volumétrica (masa unitaria) suelta y/o compactada de los agregados, así como el porcentaje de vacíos en cada condición. La densidad volumétrica se refiere a la masa por unidad de volumen del material, mientras que el porcentaje de vacíos indica la proporción de espacios vacíos dentro del material (Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC), 1995b).

NTC 126: Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) del agregado mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio

Sodio o sulfato de magnesio

Mediante este ensayo se evalúa la resistencia de los agregados pétreos a la acción del sulfato de sodio o sulfato de magnesio, simulando las condiciones de deterioro que pueden presentarse en estructuras de concreto expuestas a ambientes con presencia de sulfatos. La solidez o sanidad del agregado es un indicador de su capacidad para mantener su integridad física y sus propiedades mecánicas, cuando se encuentra en contacto con soluciones sulfatadas.

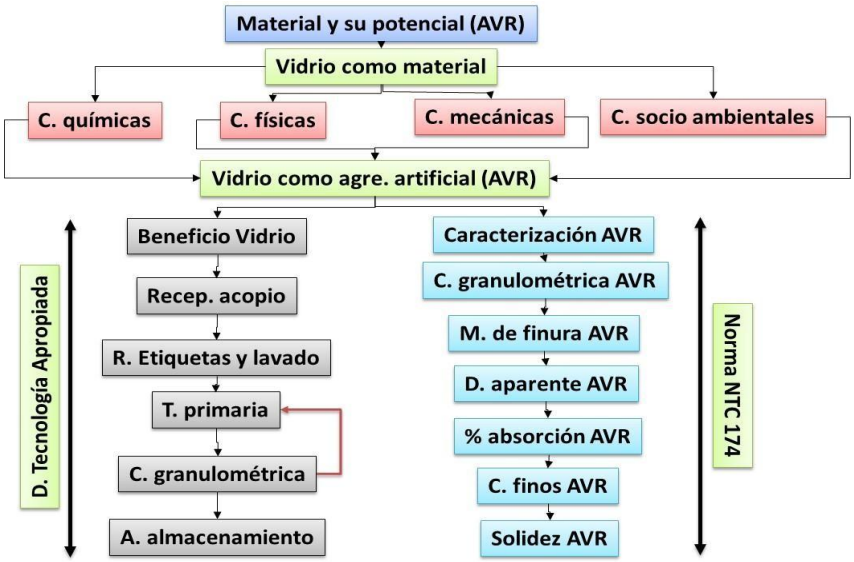
NTC 237: Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino

Este ensayo permite determinar la densidad aparente y nominal, a una temperatura de 23°C ± 2°C, y la absorción del agregado fino. La densidad aparente se refiere a la masa por unidad de volumen del material seco, sin considerar los vacíos en su interior, mientras que la densidad nominal considera el volumen total del material, incluyendo los vacíos. La absorción.

Por otro lado, indica la cantidad de agua que el agregado puede absorber (Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), p. 1995, p. 1)

En síntesis, el potencial del AVR como material depende del proceso de beneficio o preparación que se realiza para trasformar el vidrio producto del posconsumo en agregado por ende, la calidad del material resultante será producto del diseño y control de los procesos de trasformación del residuo como materia prima en producto con las características requeridas. Su factibilidad económica será el resultado de la eficiencia con que se correlacionen los procesos necesarios y su sustentabilidad depende de la adaptación al entorno donde se desarrolle la iniciativa.

Figura 1.2: Proceso de transformación de vidrio a agregado para concreto (AVR)



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 2. Confección muestras

2.1. Metodología

La Investigación se fundamenta en una metodología cuantitativa, ya que su objetivo fundamental es permitir conocer la realidad de una manera veraz e imparcial, basándose en la toma de datos y su análisis. Por lo tanto, se desarrolló una investigación teórica – práctica basada en los conceptos de la investigación experimental.

Esta investigación obtuvo los resultados de las variables de estudio, a través de la caracterización de los agregados naturales y de la arena de vidrio reciclado (AVR) basados en los parámetros definidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 174 (Especificaciones de los agregados para concreto), así como de la descripción del desarrollo de las actividades y la discusión de resultados. Posteriormente, se trazó un paralelo entre el agregado fino convencional y el agregado artificial, a partir del aprovechamiento de vidrio reciclado (AVR).

Con los resultados obtenidos en la caracterización de los agregados, se diseñó una mezcla de concreto de 21 MPa, bajo los criterios de diseño del método del ACI 211-1 (práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado) (Sánchez de Guzmán, 2001, p. 210), en la cual se establece que, para la elaboración de concretos de 21 MPa, se debe usar un factor de seguridad de F´c + 8.3, cuando se cuenta con escasos o ningún dato estadístico, como es nuestro caso.

Se optó por esta resistencia, ya que se considera de uso general y se puede abarcar un gran número de usos y aplicaciones. A partir del diseño de mezclas y las dosificaciones resultantes, se procedió a sustituir el 10%, el 25% y el 35% del agregado fino por

agregado de vidrio reciclado (AVR), realizando 15 probetas o especímenes por cada porcentaje de sustitución (ver tablas de dosificaciones).

Tabla 2.1. Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa

ASENTAMIENTO	6 CM		
CANTIDAD DE MATERIAL POR m³			m³ DE CO
MATERIAL	VOLUMEN	PESO	UNIDAD
	lt / m³	Kg / m³	
Cemento Argos UE	116,67	350,00	*Kg*
Agua max	175,00	175,00	*L*
Arena Concreto Agregados Antioquia P B	378,58	1046,40	*kg*
Grava Triturado 3/4" Agregados Antioquia P Z	309,75	858,32	*kg*
Arena Vidrio	0,00	0,00	*kg*
0		0,00	*Tn*
Agregados	688,33	1904,72	*TOTAL*
TOTAL	980,0	2429,7	

Tabla 2.2. Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 10% de sustitución de agregado fino

ASENTAMIENTO	6 CM		
CANTIDAD DE MATERIAL POR m³			O m³ DE CON
MATERIAL	VOLUMEN	PESO	UNIDAD
	lt / m³	Kg / m³	
Cemento Argos UE	116,67	350,00	*Kg*
Agua max	175,00	175,00	*L*
Arena Concreto Agregados Antioquia P B	309,75	856,15	*kg*
Grava Triturado 3/4" Agregados Antioquia P Z	309,75	858,32	*kg*
Arena Vidrio	68,83	172,08	*kg*
Agregados	688,33	1886,55	*TOTAL*
TOTAL	980,0	2411,5	

Tabla 2.3. Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 25% de sustitución de agregado fino

ASENTAMIENTO	6 CM		
CANTIDAD DE MATERIAL POR m³			IO m³ DE CONC
MATERIAL	VOLUMEN	PESO	UNIDAD
	lt / m³	Kg / m³	
Cemento Argos UE	116,67	350,00	*Kg*
0	0,00	0,00	*m³*
Agua max	175,00	175,00	*L*
Arena Concreto Agregados Antioquia P B	206,50	570,77	*kg*
Grava Triturado 3/4" Agregados Antioquia P Z	309,75	858,32	*kg*
Arena Vidrio	172,08	292,54	*kg*
Agregados	688,33	1721,62	*TOTAL*
TOTAL	980,0	2246,6	

Tabla 2.4. Dosificación para mezcla de concreto de 21 MPa con el 35% de sustitución de agregado fino

ASENTAMIENTO	6 CM		
CANTIDAD DE MATERIAL POR m³			O m³ DE CON
MATERIAL	VOLUMEN	PESO	UNIDAD
	lt / m³	Kg / m³	
Cemento Argos UE	116,67	350,00	*Kg*
Agua max	175,00	175,00	*L*
Arena Concreto Agregados Antioquia P B	137,67	380,51	*kg*
Grava Triturado 3/4" Agregados Antioquia P Z	309,75	858,32	*kg*
Arena Vidrio	240,92	409,56	*kg*
Agregados	688,33	1648,39	*TOTAL*
TOTAL	980,0	2173,4	

Posteriormente, se sometieron las probetas al ensayo de compresión a las edades de 7, 14, 28 y 56 días, con el fin de establecer el desempeño en función de las resistencias logradas.

De las mezclas con los diferentes porcentajes de sustitución de agregado fino por agregado de vidrio reciclado (AVR), se destinaron 3 probetas para realizar análisis de durabilidad mediante ensayo de velocidad de pulso ultrasónico y análisis de densidades, con el fin de estimar su durabilidad.

De los vestigios o residuos resultantes de los ensayos a compresión, a la edad de 28 días se tomaron fragmentos para analizar la estructura y la cohesión de partículas mediante estereoscopio.

También se consideró realizar ensayos de carbonatación sobre cuatro probetas posterior a los 90 días, con el fin de determinar el comportamiento de los concretos a la acción de la intemperie.

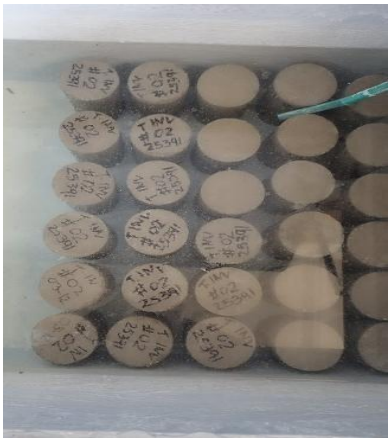
A continuación, se presenta una serie de imágenes del proceso de elaboración de las probetas de concreto.

Fotografías 2.1. y 2.2. Proceso de elaboración mezcla concreto con AVR

Fotografías 2.3., 2.4. y 2.5. Proceso de elaboración de probetas de concreto

Fotografías 2.6, 2.7. y 2.8. Control de asentamiento o slump mediante el cono de Bedoya

Fotografías 2.9, 2.10 y 2.11. Proceso de vibrado y curado de probetas de concreto con AVR. Fuente: Elaboración propia.



2.1.1. Hipótesis

El Concreto simple con Agregados de Vidrio Reciclado (CVR) presenta un óptimo desempeño físico, mecánico y químico, por lo tanto, desarrollar mezclas que empleen agregados de vidrio reciclado (AVR) como sustituto parcial a los agregados convencionales contribuye con el desarrollo de una tecnología apropiada para la construcción sostenible y la economía circular, específicamente en el municipio de Leticia. De igual forma, el CVR cumple los parámetros de resistencia y durabilidad establecidos por las Normas Técnicas Colombianas.

2.1.2. Población que participa en la investigación

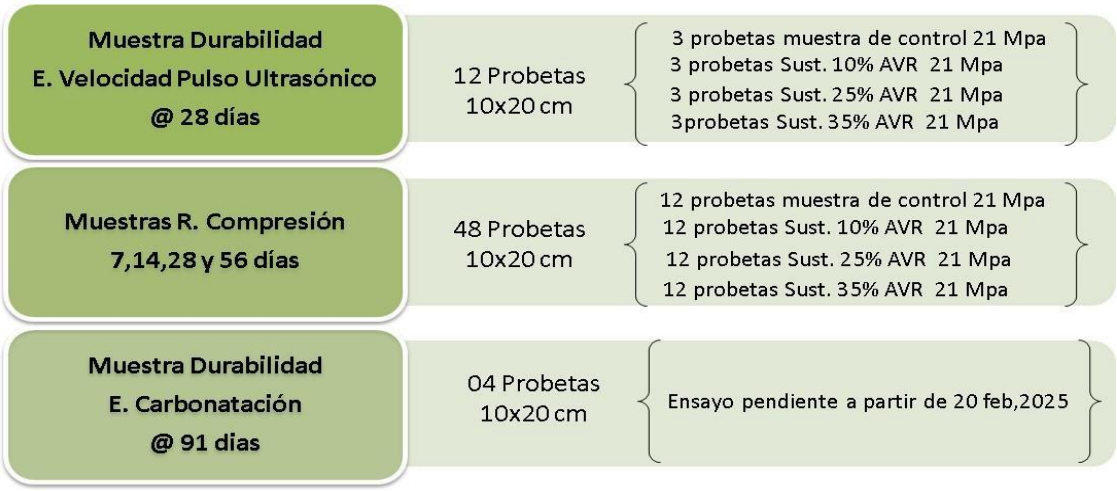
Participó un investigador principal, con formación de arquitecto constructor y especialista en construcción sostenible, que es profesor universitario y consultor para proyectos de construcción; acompañado por profesionales, laboratoristas y estudiantes universitarios, quienes apoyan los procedimientos técnicos y de laboratorio. Además, se emplearon los servicios de empresas especialistas en asesorías y ensayos de laboratorio para materiales de la construcción.

2.1.3. Definición de las muestra o especímenes

Se definió una muestra de 48 cilindros de concreto con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, para evaluar la evolución de la resistencia a la compresión a edades de 7, 14, 28 y 56 días. Se elaboraron 12 cilindros por cada tipo de mezcla, empleadas en ensayo de resistencia y 3 para ensayo de durabilidad definidas así:

- Muestra de Referencia o mezcla patrón
- Sustituciones del 10% AVR
- Sustitución del 20% AVR
- Sustitución del 35% AVR
- 12 muestras o especímenes para ensayos de durabilidad, mediante ensayos de estereoscopio, velocidad de pulso ultrasónico y carbonatación.

Figura 2.1. Representación de diseño de probetas para ensayos



2.1.4. Variables

Las variables analizadas en la investigación son de carácter cuantitativo, dado que, a partir de estos datos, se puede calcular medias, desviaciones estándar, realizar pruebas y establecer correlaciones, para determinar el cumplimiento de los objetivos y alcances de la investigación. Se consideraron las siguientes variables:

- **Características físicas y mecánicas del material**: El desempeño al esfuerzo de compresión es la variable más representativa del concreto, ya que esta es la que permite la estabilidad estructural de los elementos realizados.
- **Durabilidad**: La durabilidad es un factor representativo del desempeño de cualquier concreto y más aún cuando hablamos del empleo de materiales no convencionales para su fabricación, por lo que el considerar el CVR toma especial relevancia para estimar la capacidad de los concretos de resistir sin deterioros significativos a las acciones físicas, químicas y mecánicas a las que estarán sometidos durante su vida útil.
- **Costos**: Las materias primas para el concreto convencional y el CVR se analizarán acorde a un contexto común para ambos, identificando la asequibilidad financiera por parte de la comunidad, desde el ciudadano hasta el gran constructor.
- **Laboratorios:** Para el análisis de las muestras confeccionadas de concreto convencional y CVR, se utilizaron laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Construcción), la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia y de empresas privadas (SGS Laboratorios Contecon Urbar S.A.S y Costrulab S.A.S), las cuales cumplen criterios de calibración y aseguramiento metrológico, como también de certificación otorgada por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia ONAC.

2.1.5. Instrumentos de investigación

Presentamos una serie de instrumentos diseñados para recolectar datos numéricos y medir las variables de esta investigación, con el objeto de dar respuestas a las preguntas de investigación.

- Caracterización de los agregados empleados (validados), donde se cuantifica y se valora los siguientes aspectos:
    - Módulo de finura
    - Densidad
    - % de absorción
    - Contenido de materia orgánica
    - Curva granulométrica
- Lista de precios de los materiales para la fabricación de concretos (validados)
- Ensayos de resistencia a la compresión en prensa hidráulica (validados)
- Ensayos de laboratorio al concreto endurecido. Velocidad de pulso ultrasónico VPU (validados)
- Ensayos de laboratorio al concreto endurecido. Estereoscopia
- Ensayos de laboratorio al concreto endurecido. Carbonatación
- Instrumentos y equipos de los laboratorios de construcción y estructuras de la Universidad Nacional de Colombia y las empresas Contecon y Costrulab (validados)

2.1.6. Análisis de los datos

Los datos que se procesaron son una combinación de información cuantitativa (finura, densidad, porcentaje de absorción, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, precios por unidad de referencia) e información cualitativa (observación de estereoscopia, evaluación de la carbonatación e interpretación de la curva granulométrica). Los datos se procesaron y analizaron de la siguiente forma:

- **Procesamiento de datos:** Para los resultados cuantitativos, se realizó mediante la tabulación y posteriormente análisis de cuadros estadísticos. Los datos

cualitativos corresponden a un proceso más interpretativo y subjetivo basado en la descripción.

Con estos métodos se pretende construir uno o varios epígrafes de presentación resumida de resultados para la validación de la hipótesis presentada.

2.1.7. Resultados obtenidos

Al finalizar la investigación, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Una base comparativa de atributos cualitativos a partir de la caracterización a los agregados.
- Una tabla comparativa de resultados de esfuerzo de la compresión del CVR a edades de 7, 14, 28 y 56 días, comparados con una mezcla de referencia o de control confeccionada con materiales convencionales.
- Una tabla comparativa en referencia a los resultados de densidad del CVR en estado endurecido, velocidad de pulso ultrasónico VPU comparados con una mezcla de referencia confeccionada con materiales convencionales.
- Un análisis de precios unitarios (APU) del CVR con precios vigentes en el contexto del AMVA, como criterio de comparación con la muestra patrón.
- Un documento en el cual se muestre que el empleo de CVR bajo el contexto de un eco-material aporta de manera positiva a la solución de la problemática ambiental de la disposición final del vidrio como residuo y mejora sustancialmente la calidad y durabilidad de las mezclas confeccionadas a partir de CVR.

2.1.8. Resultados

2.1.8.1. Caracterización del agregado provenientes del reciclaje de vidrio (AVR)

Los resultados de la caracterización del agregado de vidrio reciclado (AVR) se enmarcan en lo establecido por la norma NTC 174 "Especificaciones de los agregados para concreto", la cual guarda equivalencia con la norma ASTM C 33. Se realizó una comparación a partir de los resultados obtenidos para el agregado fino convencional.

Los resultados obtenidos están validados mediante el laboratorio de materiales de la empresa Contecon Urbar y se anexan a la tesis en el respectivo apartado.

2.1.8.2. Análisis de la curva granulométrica del AVR según criterios de la Norma NTC 77

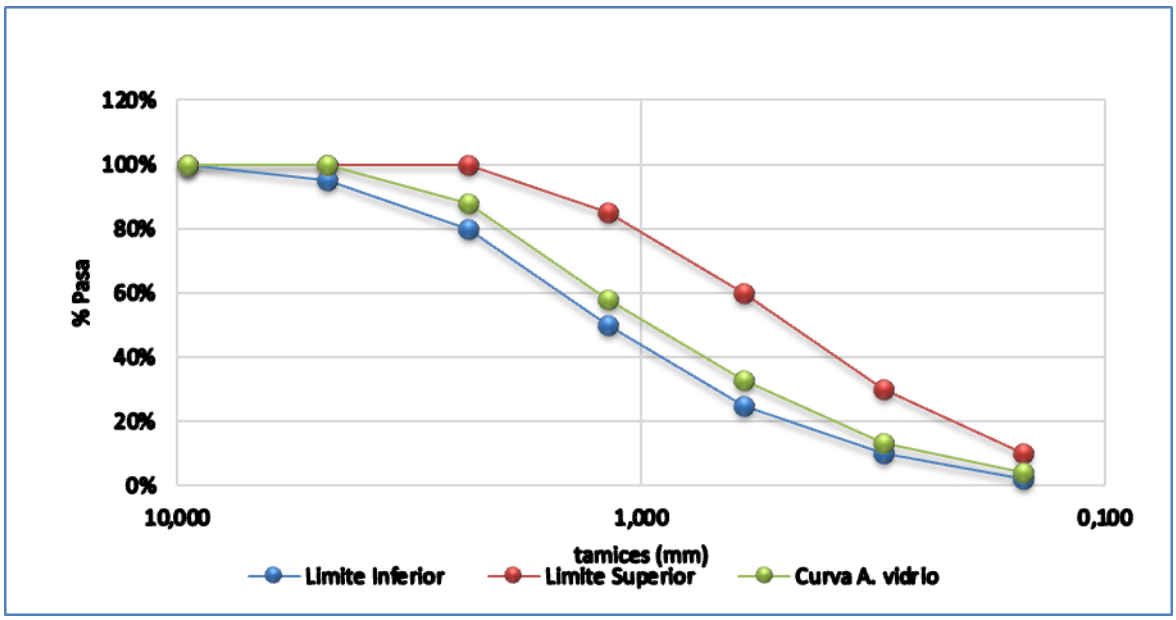
A partir de la Tabla 2.5 Podemos determinar que el AVR cumple con lo establecido en la norma como agregado fino (ver Grafica 2.1. y Tabla 2.5.), bajo los siguientes criterios de análisis:

- Forma de la curva: Presenta uniformidad, definiendo una curva suave lo que indica una buena gradación.
- Contenido de finos y gruesos: La pendiente de la cuerva en diferentes partes nos indica una buena proporción de partículas finas y gruesas.
- Comparación con curvas ideales: La curva resultante se enmarca en los parámetros y límites definidos para los tamaños mínimos y máximos.
- Módulo de finura: A partir de la información de la Tabla 2.5 se puede determinar el Módulo de finura (MF) que para el caso de estudio es 2.96.

Tabla 2.5. Análisis granulométrico arena de vidrio

ARENA DE VIDRIO M1					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA = 1995,9 gr					
TAMIZ		Peso Retenido (Kg)	Peso Retenido (%)	Retenido Acomulado (%)	Pasante Acomulado (%)
Pulg.	mm				
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 04	4,750	0,20	0,01	0,01	99,99
N° 08	2,360	233,70	12,00	12,02	87,98
N° 16	1,180	583,40	29,97	41,98	58,02
N° 30	0,600	494,60	25,41	67,39	32,61
N° 50	0,300	376,60	19,35	86,74	13,26
N° 100	0,150	179,20	9,21	95,94	4,06
N° 200	0,075	74,50	3,83	99,77	0,23
FONDO		4,50	0,23	100,00	0,00
TOTAL		1946,70	100,00	-	-

Gráfica 2.1. Análisis granulométrico arena de vidrio



En resumen, al analizar la curva granulométrica del agregado "A. Vidrio" bajo los criterios de la NTC 77, evaluamos que el AVR es apto para su uso en obras de construcción, asegurando así la calidad y el desempeño de las estructuras.

2.1.8.3. Material que pasa el tamiz 75 µm (malla 200) en AVR según criterios de la norma NTC 78

Para determinar la cantidad de material que pasa el tamiz 75 µm o comúnmente denominada malla 200, se empleó el método de lavado con agua potable y, a partir del material retenido, se pudo cuantificar la cantidad de partículas finas (arcillas y limos) presentes en el AVR (Ver Tabla 2.6.)

Tabla 2.6. Análisis ensayo de material que pasa tamiz 0.075 mm

INFORME DE ENSAYO		
Material que pasa tamiz 0,075 mm (Malla 200) NTC 78-1995 (lavado con agua potable)		
Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	% que pasa
1999,2	1959,1	2,01

En resumen, analizando los resultados del ensayo se puede inferir que el contenido de material fino es relativamente bajo, porque se puede considerar que el AVR es apto para su uso en obras de construcción, asegurando así la calidad y el desempeño de las estructuras.

2.1.8.4. Determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en AVR según criterios de la NTC 92

Mediante este ensayo, se determinó la densidad volumétrica (masa unitaria) suelta y/o compactada del AVR, así como el porcentaje de vacíos en cada condición (ver Tabla 2.7.).

Tabla 2.7. Análisis de densidad aparente del AVR

MASA UNITARIA COMPACTADA			MASA UNITARIA SUELTA		
Masa de la muestra + molde (g)	1	6117,0	Masa de la muestra + molde (g)	1	5568,0
	2	6118,0		2	5574,0
	3	6127,0		3	5579,0
Promedio (g)		6120,7	Promedio (g)		5573,7
Masa del molde (g)		1669,0	Masa del molde (g)		1669,0
Masa neta de la muestra (g)		4451,7	Masa neta de la muestra (g)		3904,7
Volumen del model (c^{m3})		2989,8	Volumen del model (c^{m3})		2989,8
Masa unitaria compactada (kg/Cm^3)		1489,0	Masa unitaria compactada (kg/Cm^3)		1306,0

A partir de la tabla anterior, se puede determinar lo siguiente:

- Densidad: El AVR presenta una densidad alta, tanto en estado compactado como suelto, lo que sugiere que por ser un material denso puede contribuir a una mayor resistencia en los concretos confeccionados.
- Vacíos: El AVR el porcentaje de vacíos es moderado, dadas la estrecha diferencia entre la masa unitaria compactada y la masa unitaria suelta.

2.1.8.5. Solidez (sanidad) del AVR mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio según criterios de la NTC 126

Se evalúo la resistencia del AVR a la acción del sulfato de sodio, simulando las condiciones de deterioro que pueden presentarse en estructuras de concreto expuestas a ambientes con presencia de sulfatos (ver Tabla 2.8.). Este indicador define la capacidad para mantener la integridad física y sus propiedades mecánicas cuando se encuentra en contacto con soluciones sulfatadas. De este ensayo se puede concluir lo siguiente:

Tabla 2.8. Solidez del AVR

ENSAYO DE SOLIDEZ Y SANIDAD DEL AVR							
Masa Inicial (g):	1956			Solución empleada en el ensayo: Sulfato de sodio			
% Material mayor a 4,75 mm:		0%					
% Material menor a 4,75 mm:		100%					
Apertura de tamiz		% Retenido Gradacion Muestra Original	% Retenido Gradacion Muestra por Agregado	Masa Fracciones antes del Ensayo	Masa Fracciones despuesdel Ensayo	% que pasa el tamiz designado despues del ensayo	% de perdida ponderado (% de perdida corregido)
Pasa	Retiene						
AGREGADO FINO (AVR)							
9,5	4,75	0,01%	0,01%				
4,75	2,36	11,95%	13,84%	100	99,1	0,9%	0,1%
2,36	1,2	29,83%	34,55%	100	99,2	0,8%	0,3%
1,2	0,6	25,29%	29,29%	100	99,4	0,6%	0,2%
0,6	0,3	19,26%	22,30%	100	99,6	0,4%	0,1%
0,3	0,15	9,16%					
0,15	0,075	3,81%					
Fondo		1%					
TOTAL			100,00%				1,00%

- Solidez del agregado: Una pérdida de masa del 1% indica que el AVR presenta una buena resistencia a la acción de sulfatos por lo que se considera aceptable para la mayoría de aplicaciones en concretos.
- Influencia de la granulometría: El AVR se considera un agregado fino, por lo que se podría pensar que es más susceptible a la acción de los sulfatos que un agregado grueso, no obstante, los resultados indican que la granulometría del AVR no compromete la solidez del material.
- Acción del sulfato de sodio: La solución empleada en el ensayo causó una pérdida de masa en el agregado de 1%, lo cual es esperado. Esta pérdida se debe a la reacción química entre los componentes del agregado y la solución de sulfato de sodio, lo que puede provocar la disolución de algunos minerales o la formación de nuevos compuestos.

A partir de los resultados obtenidos en este ensayo, se determinó que el AVR presenta una buena solidez y es adecuado para el uso en la mayoría de las aplicaciones del concreto.

2.1.8.6. Densidad y la absorción del AVR bajo criterios de la norma NTC 237

Mediante este ensayo se determinó la densidad aparente y nominal, a una temperatura de 23°C ± 2°C, y la absorción del AVR; haciendo énfasis en que la densidad aparente se refiere a la masa por unidad de volumen del material seco sin considerar los vacíos en su interior, mientras que la densidad nominal considera el volumen total del material, incluyendo los vacíos. La absorción, por otro lado, se cuantifico la cantidad de agua que AVR puede absorber (ver Tabla 2.9.).

Tabla 2.9. Ensayo de densidad y absorción del AVR

ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCION DEL AVR	
NORMA NTC 237-1995	
MUESTRA	**m^3**
Masa de la muestra sss, Msss (g)	500
Masa de muestra seca Ms (g)	496,9
Masa Picnometro lleno con agua (g)	972,3
Masa Picnometro con muestra y agua (g)	670,1
Densidad Nominal (g/cm^3) 23°C	2,55
Densidad Aparente (g/cm^3) 23°C	2,51
Densidad SSS (g/cm^3) 23°C	2,52
Porcentaje de absorción (%)	0,62

De los resultados contenidos en la tabla se deduce lo siguiente.

- Baja absorción: La absorción de 0.62% indica que el AVR tiene una baja capacidad para absorber agua. Lo que se considera deseable en los agregados, dado que una baja absorción contribuye a una mayor durabilidad del concreto y reduce el riesgo de contracción por secado.
- Densidad alta: La densidad del AVR se encuentra dentro de un rango típico para muchos agregados utilizados en construcción. Generalmente mayor densidad implica una mayor resistencia del concreto.

2.1.8.7. Análisis comparativo y correlacionado entre agregados finos y AVR

En la Tabla 2.10 se ofrece un análisis comparativo de tres agregados finos: arena de concreto de la empresa Agregados Antioquia, arena del río Japurá (agregado comercializado en la ciudad de Leticia) y el AVR. Se correlacionan en función de los parámetros establecidos en la norma NTC 174.

A continuación, se realizará un análisis detallado de cada parámetro y se establecerán las diferencias y similitudes entre los tres agregados:

- **Análisis de curva granulométrica**: El AVR y la arena de concreto cumplen con este parámetro, por lo tanto, presentan una adecuada distribución de los tamaños de partículas. La arena del río Japurá no cumple, es decir, que presenta una distribución irregular del tamaño de las partículas, por lo que se infiere que puede afectar la trabajabilidad y resistencia del concreto. (Corral, 2012)
- **Módulo de finura:** El AVR y la arena de concreto presentan valores cercanos (2.94 y 2.96 respectivamente), lo que indica una finura similar y, para el caso de la arena del río Japurá, este presenta un módulo de finura de 1.4, es decir, que presenta un tamaño promedio de partículas ostensiblemente más finas. Esto podría indicar un mayor contenido de arcillas o limos, lo que afecta negativamente la trabajabilidad y resistencia del concreto.(Corral, 2012)
- **Densidad aparente:** Los tres agregados presentan densidades similares, lo que sugiere una composición mineralógica similar.
- **% de absorción:** la arena del rio Japurá y la arena de concreto presentan porcentajes similares, sin embargo, el AVR presenta una absorción significativamente menor, lo que indica menor porosidad y mayor durabilidad.
- **Contenido de finos:** Los tres agregados presentan contenido de finos similares, sin embargo, la arena de concreto presenta mayor concentración de estas partículas.
- **Solidez de los agregados**: La arena de concreto y AVR presentan una solidez aceptable, lo que indica una buena resistencia a la disgregación, en cuanto a la arena del río Japurá, no se reporta este dato.

Tabla 2.10. Análisis comparativo entre agregados finos según Norma NTC 174

ANALISIS COMPARATIVO ENTRE AGREGADOS FINOS SEGÚN NORMA NTC 174			
PARAMETRO NORMA NTC 174	**A. CONCRETO A. ANTIOQUIA**	**A. RIO JAPURA**	**AVR**
Curva Granulometría	Cumple	No Cumple	Cumple
Módulo de Finura	2,94	1,4	2,96
Densidad Aparente	2,54	2,59	2,51
Absorción %	1,77	1,46	0,62
Contenidos finos (M. Orgánica) %	3,40%	2,00%	2,00%
Solidez de Agregado	14%	N.R	1%

En conclusión:

- AVR: Se destaca por su baja absorción y cumplimiento de los requisitos granulométricos, lo que lo convierte en un agregado de buena calidad y potencialmente más duradero.
- Concreto: Cumple con la mayoría de los requisitos, pero su absorción es ligeramente superior al AVR.
- Arena del río Japurá: No cumple con los requisitos granulométricos y presenta un módulo de finura significativamente menor, lo que sugiere que no es un agregado recomendable.

2.1.9. Desempeño del CVR al esfuerzo de compresión

La principal exigencia a la cual se somete un concreto es su capacidad de resistir esfuerzos de compresión Sánchez de Guzmán, D. (2009). *Tecnología del Concreto* (Tomo I, 8.ª ed.). Asocreto., gracias a esto podemos crear estructuras con diversas formas y características, como si recreáramos rocas, pero de una manera artificial.

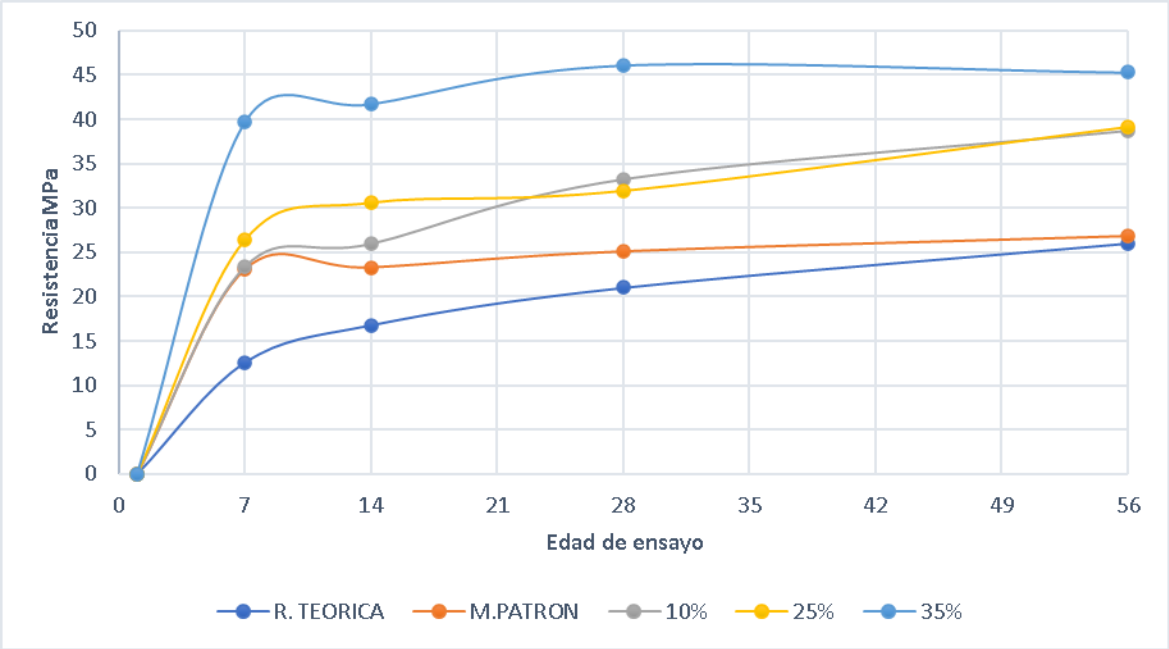
A pesar de la importancia que tiene la resistencia a la compresión del concreto, no siempre se estudia a profundidad, limitando (por la mayoría de los profesionales) su evaluación a 28 días, asumiendo que, a partir de esta edad, se cumple la resistencia para cualquier tipo de edificación. Es de aclarar que, según lo especificado en la norma, es recomendable extender su estudio a edades superiores; por tanto, se extendió el análisis

de los resultados a 56 días, sin embargo, se recomienda realizar análisis de resultados a edades superiores (Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, 2010).

Tabla 2.11. Resultados de ensayo de compresión a 56 días

	RESISTENCIA Mpa			
EDAD DE ENSAYO	0%	10%	25%	35%
1 día	0	0	0	0
7 días	23,1	23,43	26,43	39,77
14 días	23,3	26,00	30,60	41,77
28 días	25,1	33,27	31,93	46,13
56 días	26,83	38,74	39,12	45,33

Gráfica 2.2. Curva de resistencia a compresión a 56 días

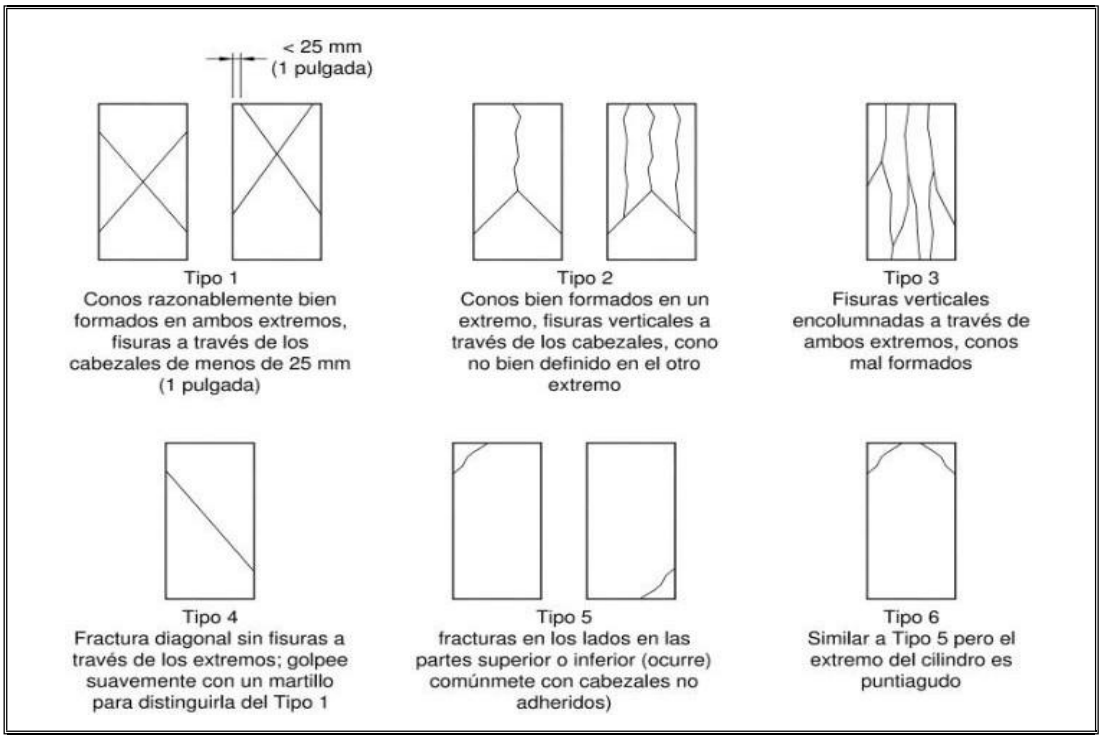


Se observa una tendencia lineal de la resistencia a compresión del concreto a los 56 días, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Lo que sugiere que la presencia de AVR, en altas proporciones, podría tener incidencia en el desarrollo de la resistencia a largo plazo del concreto.

Una posible explicación del comportamiento lineal sugiere que la relación entre factores como la granulometría, forma y textura del AVR, así como su interacción con la matriz de cemento y los agregados naturales, juegan un papel determinante en el desarrollo de la resistencia. La optimización de estos factores podría ser clave para mejorar el desempeño del concreto con AVR.

Basándose en lo establecido por norma en lo referente a la forma de falla o fractura que presentaron los cilindros de prueba, se resalta que estos presentaron patrones que se asemejan a la figura tipo 2 (ver figura 2.2), lo que sugiere una distribución de esfuerzos uniforme, por ende, se podría definir como un buen comportamiento del concreto, lo cual se corrobora con los resultados obtenidos (Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, 2010).

Figura 2.2. Esquemas de fracturas típicas en cilindros en ensayos a compresión (Fuente: ICONTEC, NTC 673, 2021)



2.1.10. Resultados de densidad y velocidad de pulso ultrasónico PVU del concreto con AVR

Para este ensayo, las probetas cilíndricas se curaron durante 28 días sumergidas en agua y, luego de este periodo de curado, se secaron durante siete días a temperatura ambiente. Se tomaron las medidas con el fin de determinar las densidades individuales y sus respectivos promedios por cada una de las mezclas con los diferentes porcentajes de sustitución, posteriormente se procedió a medir la VPU. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 2.12. Resultados de densidad y velocidad de pulso ultrasónico PVU

Muestra	Información de muestras		Diámetro (m)	Radio (m)	Altura (m)	Volumen (m)	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)	Densidad promedio (kg/m³)	VPU (m/s)	VPU promedio (m/s)
	Fecha de vaciado (d/m/a)	ID									
Patrón	2/12/2024	1.1	0,102	0,051	0,208	0,0017	3,750	2214,40	**2251,09**	4185,00	**4204,67**
	2/12/2024	1.2	0,100	0,050	0,206	0,0016	3,694	2270,74		4196,00	
	2/12/2024	1.3	0,100	0,050	0,207	0,0016	3,720	2268,13		4233,00	
10%	3/12/2024	2.1	0,100	0,050	0,205	0,0016	3,782	2351,11	**2351,40**	4496,00	**4516,00**
	3/12/2024	2.2	0,102	0,051	0,205	0,0017	3,930	2334,37		4566,00	
	3/12/2024	2.3	0,100	0,050	0,205	0,0016	3,796	2368,71		4486,00	
25%	4/12/2024	3.1	0,102	0,051	0,203	0,0017	3,890	2356,64	**2362,60**	4521,00	**4553,00**
	4/12/2024	3.2	0,101	0,050	0,204	0,0016	3,872	2376,57		4543,00	
	4/12/2024	3.3	0,099	0,050	0,204	0,0016	3,716	2354,59		4595,00	
35%	5/12/2024	4.1	0,101	0,050	0,204	0,0016	4,035	2473,36	**2441,41**	4811,00	**4869,33**
	5/12/2024	4.2	0,102	0,051	0,203	0,0017	4,006	2425,33		4928,00	
	5/12/2024	4.3	0,101	0,050	0,204	0,0016	3,937	2425,54		4869,00	
	PROMEDIO		**0,101**	**0,050**	**0,205**	**0,0016**	**3,844**			**4535,75**	

El análisis de densidades y velocidad de pulso ultrasónico VPU en los cilindros de concreto proporciona información relevante sobre la calidad de los concretos confeccionados, en lo referente a su homogeneidad y su potencial desempeño en los usos proyectados.

Según Vidaud Quintana, en el artículo publicado en la revista *Construcción y tecnología en concreto* de enero de 2016, denominado “Ultrasonido: Aplicaciones para determinar el módulo de elasticidad dinámico” y que, a su vez, se fundamenta en la norma ASTM-C 597, un concreto que presenta una VPU que esté entre 3660 m/s y 4575 m/s se considera bueno, por debajo de este rango se considera regular y por encima se considera excelente (ver Tabla 2.14) (Vidaud Quintana, 2016).

Tabla 2.13. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

Condición General	Velocidad del Pulso V [m/s]
Excelente	> 4575
Bueno 3660	< V < 4575
Cuestionable	3050 < V < 3660
Pobre	2125 < V< 3050
Muy Pobre	< 2125

Fuente: Feldman, R. F. (1977). CBD-187. Non-Destructive Testing of Concrete. National Research Council Canada. https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=925121b6-3d6a-4318-8f83-36367554a44f

A continuación, se muestra un registro fotográfico del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico VPU realizado en el laboratorio de materiales de Construcción de la facultad de arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Fotografía 2.12. Ensayo de VPU

Fotografía 2.13. Lectura VPU

Fotografía 2.14. Lectura VPU

Entre tanto, la densidad en el concreto es un factor determinante a la hora de analizar su calidad, ya que, por lo general, un concreto más denso implica menos poros y una mejor compactación e integración de los agregados. Esto se traduce a una mayor resistencia a la compresión bajo el principio de presentar una estructura más sólida, dotándolo de la capacidad de soportar mejor las cargas aplicadas. Quintero Ortiz, L. A., Herrera, J., Corzo, L., & García, J. (2011)

A partir de la correlación entre el ensayo de densidad y la VPU, se pueden establecer la calidad de los concretos confeccionados, desde el punto de vista de resistencia a compresión, como del control de procesos de producción.

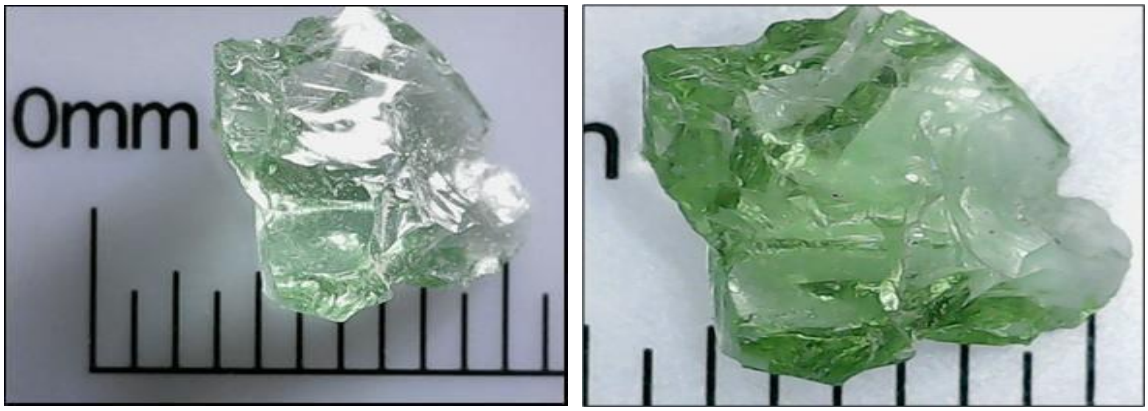
2.1.11. Análisis descriptivo de micrografías estereoscópicas del concreto con AVR

A continuación, se expone un registro fotográfico obtenido mediante microscopía estereoscópica. Esta sección tiene como finalidad ilustrar en detalle la interacción entre las partículas del agregado de vidrio reciclado (AVR) y la matriz cementicia del concreto, permitiendo un análisis visual de su morfología y distribución

- **Micrografías estereoscópicas de AVR**

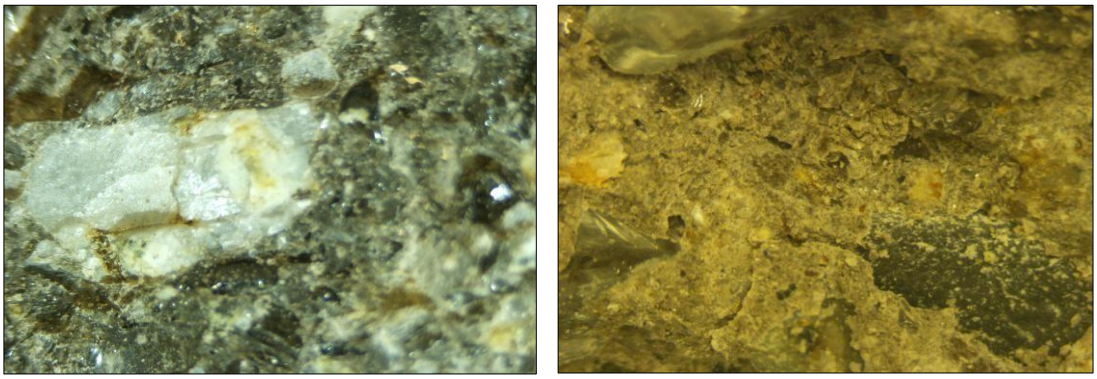
Fotografía 2.13. AVR vista general

Fotografía 2.14. Dimensiones en mm de AVR

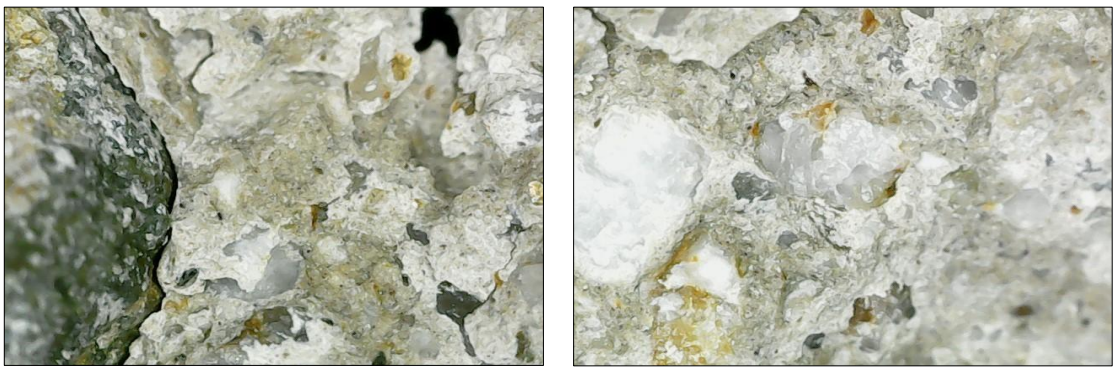


Fotografía 2.15. Vista general de AVR

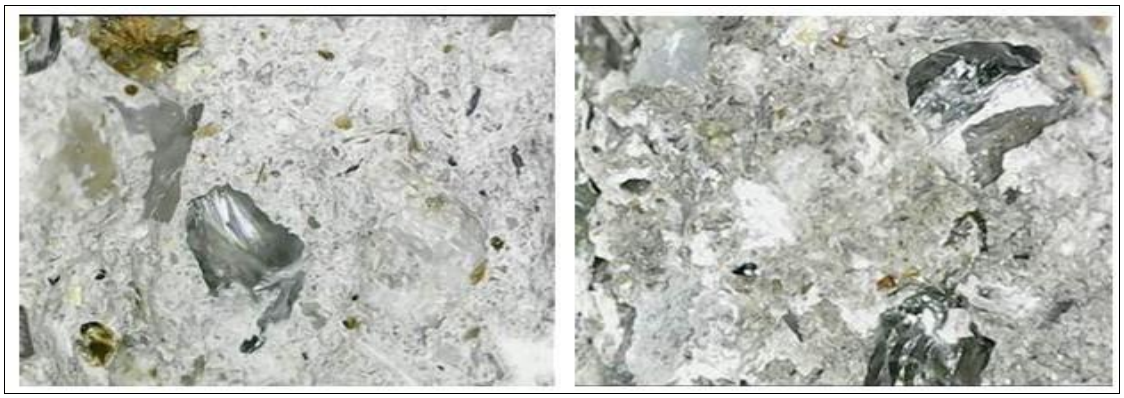
Fotografía 2.16. Micrografías estereoscópicas del concreto convencional MP



Fotografía 2.17. Micrografía estereoscópica del concreto convencional (MP)



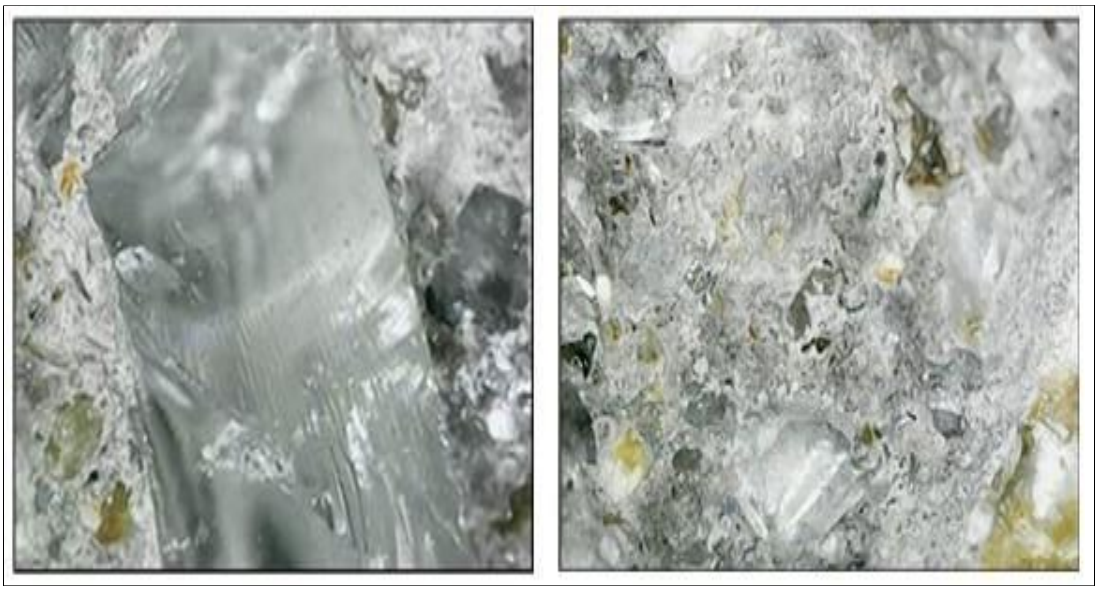
Fotografía 2.18. Micrografía estereoscópica del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR



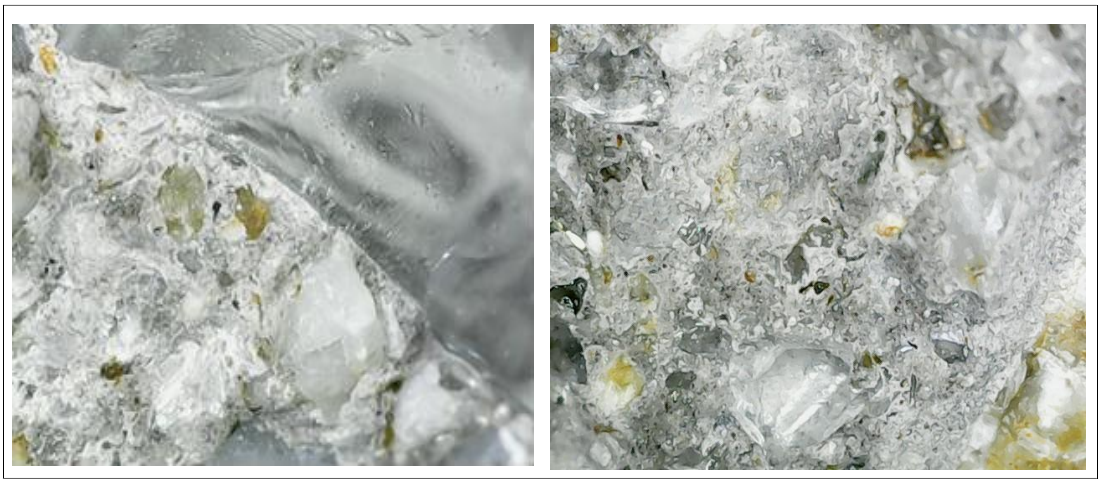
Fotografía 2.19. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR

Fotografía 2.20. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 10% de agregado convencional por AVR

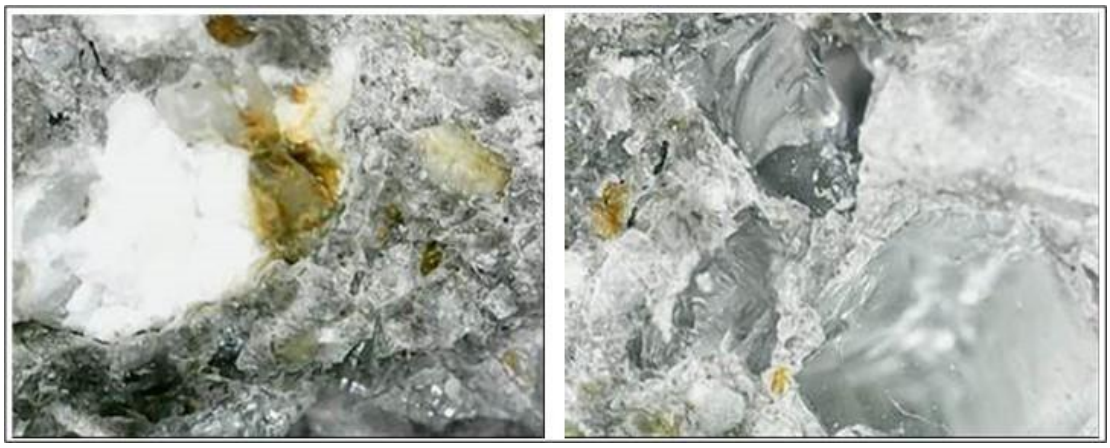
Fotografía 2.21. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% de agregado convencional por AVR



Fotografía 2.22. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% AVR



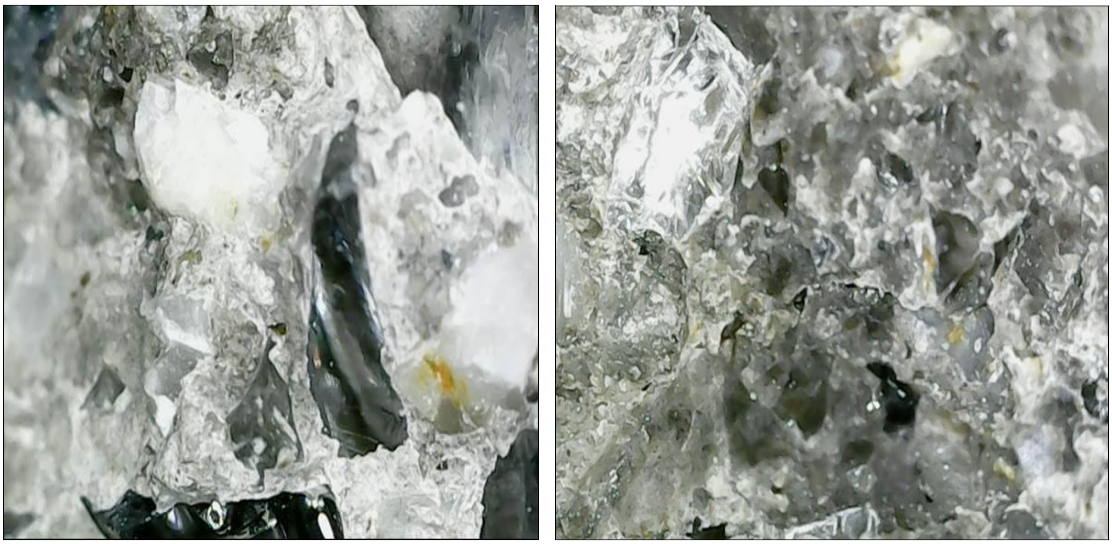
Fotografía 2.23. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 25% AVR



Fotografía 2.24. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% de agregado convencional por AVR

Fotografía 2.25. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% AVR

Fotografía 2.26. Micrografías estereoscópicas del concreto con sustitución del 35% AVR



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3. Contexto ambiental del nuevo material

Para hablar sobre el contexto ambiental del concreto confeccionado a partir del reciclaje de vidrio, necesariamente hay que entrar a analizar la relación existente entre los agregados convencionales comercializados en la región, la actividad minera de su extracción y los impactos ambientales ocasionados a los ecosistemas donde se extraen, y la posible relación con la minería ilegal del oro en la región. Por otra parte, existe una problemática asociada al manejo y disposición de los RSD especialmente aquellos relacionados con envases y recipientes de vidrio, los cuales representan un porcentaje considerable de los residuos generados en la región.

Esta investigación se basa en encontrar una alternativa sostenible para el uso del concreto y en consecuencia a la minería de agregados en la Amazonía colombiana. Como resultado a este proceso, se presenta una propuesta innovadora: la sustitución de las arenas de río por arenas de vidrio reciclado (AVR). Al combinar un enfoque técnico riguroso, con una visión ambiental, se proyecta contribuir a la preservación de la Amazonía y a la promoción de una economía circular.

Como futuro investigador y habitante de la Amazonía, esta investigación me ha sumergido en una profunda solastalgia[4]. Durante el proceso de investigación se ha

[4]**Solastalgia:** Neologismo que describe una forma de angustia, estrés mental o existencial causado por el deterioro medioambiental Acuñado por el filósofo Glenn Albrecht en el año 2005, el término está compuesto por la palabra latina *sōlācium* (comodidad) y la raíz griega *-algia* (dolor)

evidenciado una preocupante relación asimétrica entre el desarrollo económico y la conservación ambiental, lo que ha exacerbado el sentimiento de pérdida y desarraigo. La expansión de la minería ilegal y su posible relación con la construcción están acelerando la degradación de los ecosistemas amazónicos, confirmando las predicciones más pesimistas y profundizando la crisis socioambiental en la región. (J. D. Velásquez Builes, comunicación personal, 2025).

A partir del concreto se ha moldeado la forma física y la infraestructura de la ciudad moderna, por lo que se podría traer a colación el concepto de “autopoiesis” del doctor Humberto Maturana y decir, a manera de metáfora, que el concreto es un molécula fundamental y estructurante del ADN de las ciudades. A esta realidad, no es ajena la Amazonía.

Para un número importante de personas. la Amazonía trae el imaginario de un paraíso prístino y exuberante, sin embargo, esta visión contrasta con la realidad de una región sometida a una creciente presión antrópica.

En general, la Amazonía, región compartida por Brasil, Perú, Bolivia, Ecuador, Venezuela, Guyana, Surinam y Colombia, alberga una población estimada en 48 millones de personas, según la OTCA y el WWF[5] (https://otca.org/la-amazonia/).

Una de las consideraciones importantes a tener en cuenta en lo referente a los asentamientos humanos allí es que se distribuyen de manera desigual, presentando altas concentraciones a lo largo de las principales vías fluviales, como lo es el caso de las ciudades de Belem do Para, Manaos e Iquitos (todas ellas superan ampliamente el millón de habitantes), mientras que en la selva profunda la densidad poblacional es extremadamente baja, con pequeñas poblaciones generalmente dispersas.

Bajo este orden de ideas, la creciente demanda de recursos naturales, impulsada por el crecimiento demográfico y sus respectivas actividades económicas, plantea serios desafíos para la sostenibilidad de la región. Según la Federación Interamericana del Cemento (FICEM), en su informe estadístico del año 2021, el consumo per cápita de

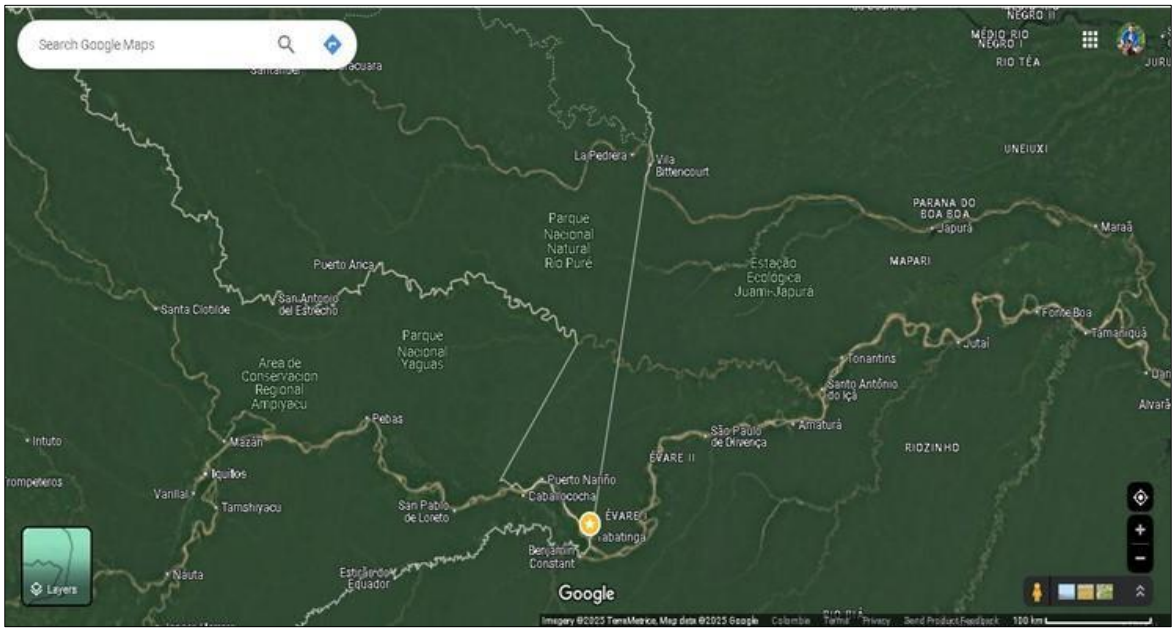
[5] OTCA Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. WWF World Wide Fund for Nature (Fondo Mundial para la naturaleza)

cemento fue de 289 kg año por habitante en América Latina (Revista Cemento y Concreto, 2021).

Interpolando este dato a la región, implica una demanda anual estimada de 11.5 millones de toneladas de cemento y la producción de aproximadamente 33 millones de metros cúbicos de concreto. Para la producción de este volumen de concreto, se requiere un consumo anual de alrededor de 41 millones de metros cúbicos de agregados (arena y grava), lo que equivale a un 1 metro cubico por habitante por año. Este acercamiento a las demandas de agregados per cápita en la región cuestiona la sostenibilidad en el tiempo de la actividad extractivista de agregados para el concreto. (J. D. Velásquez Builes, comunicación personal, 2025).

A pesar de que el indicador anteriormente referido, sugiere una alta demanda de agregados en la Amazonía, la heterogeneidad de la región impide generalizaciones. Ergo se considera necesario analizar casos específicos y nos centraremos en el de Leticia, Colombia, y los procesos de extracción de agregados que abastecen a esta ciudad.

Figura 3.1. Mapa de Google con la ubicación de Leticia, Colombia



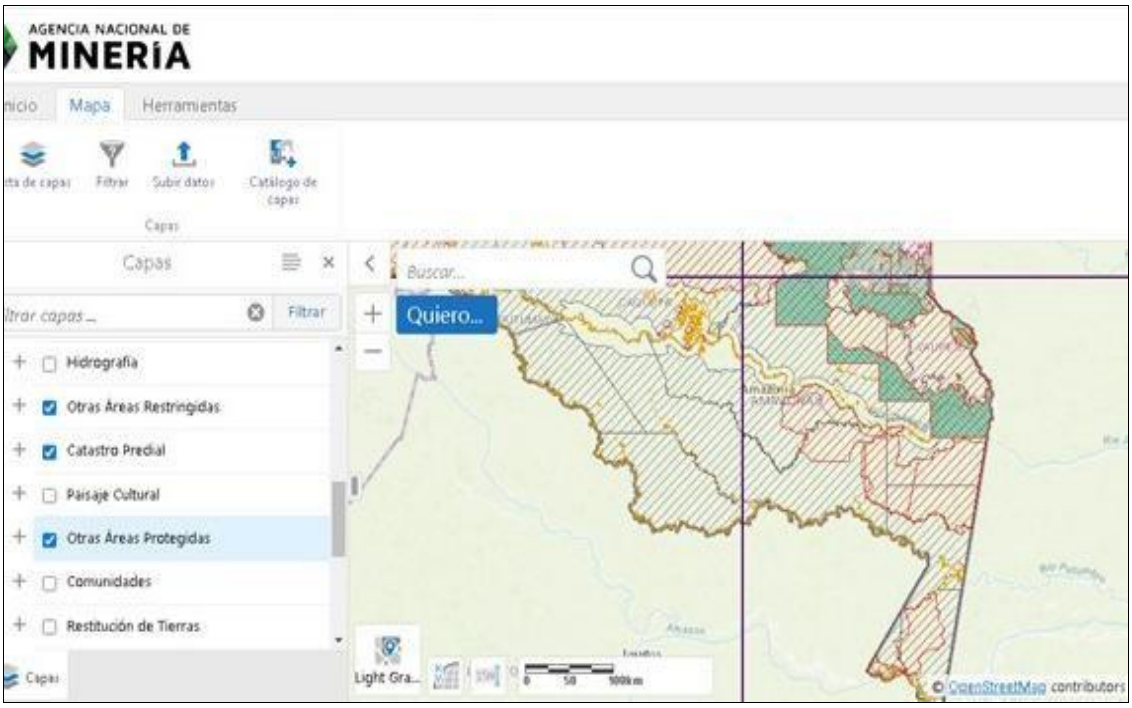
Leticia hace parte de una conurbación muy particular que se presenta con la ciudad de Tabatinga, Brasil, y Santa Rosa, Perú, con una población combinada cercana a los

100 000 habitantes, lo que arroja una demanda anual estimada de 100 000 metros cúbicos de agregados al año y lo que supone un desafío logístico significativo. Es importante resaltar que los afloramientos rocosos más próximos en territorio de Colombia se encuentran en el corregimiento de La Pedrera, a 350 km de distancia y accesibles únicamente por vía fluvial, lo que implica un viaje de 22 días (ver Figura 3.2.).

La ausencia de títulos, concesiones o licencias mineras para la extracción de agregados en Leticia o zonas cercanas (y, en general, en el departamento del Amazonas) obliga a depender de suministros provenientes de Brasil. Esta situación genera una gran incertidumbre respecto a la legalidad de estas operaciones y a las prácticas minero ambientales empleadas. Considerando que la mayor parte de estos materiales proviene de una zona con alta incidencia de minería ilegal de oro, como el río Japurá (nombre que recibe del río Caquetá al ingresar a territorio brasileño). Es probable que la extracción de agregados esté asociada a impactos ambientales y sociales negativos, y sin un presunto control regulatorio.

Es de resaltar que la maquinaria empleada en la extracción de agregados de aluvión (dragas) es igual a la utilizada en la minería de oro de aluvión. Esta similitud facilita la rápida transformación de operaciones legales en ilegales, convirtiendo a la minería de agregados en una fachada perfecta para la extracción clandestina de oro. Esta situación no solo intensifica los problemas ambientales y sociales inherentes a la minería ilegal, sino que también dificulta la detección y control de estas actividades.

Figura 3.2. Agencia Nacional de Minería. (s.f.). Visor SIGM – Sistema de Información Geográfica Minero [Mapa interactivo]. Agencia Nacional de Minería. https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt



En este sentido, resulta fundamental realizar investigaciones enfocadas en comprender a fondo la problemática de la minería ilegal en la Amazonía, sus causas, consecuencias y posibles soluciones, con el objetivo de contribuir a la preservación de este ecosistema vital para el planeta.

3.1. El vidrio desde la perspectiva del residuo

Según el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos de 2021, Leticia presenta un panorama particular en cuanto a la gestión de sus residuos. A pesar de contar con un relleno sanitario con una vida útil proyectada de 17.3 años, la ciudad genera diariamente 10 toneladas de residuos día (Departamento Nacional de Planeación (DPN)+Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2023).

Al analizar estos datos, en relación con la población de Leticia, que según el DANE en 2022 era de aproximadamente 44 000 habitantes, se observa que la generación per cápita es de 0,206 kg/día por habitante o 820 kg/año. Esta cifra es superior al promedio nacional que se sitúa en 520 kg/año por habitante.

Este indicador podría estar influenciado por diversos factores que no se ven reflejados en las estadísticas. Por ejemplo, la cobertura del servicio de aseo en zonas periféricas o de difícil acceso, subestimando el volumen total de residuos generados. Además, el hecho de que una parte significativa de la población de Leticia posea animales de corral en sus viviendas, lo sugiere que podría existir un aprovechamiento in situ de los residuos orgánicos, como el compostaje o la alimentación animal. Estas prácticas, aunque beneficiosas para el medio ambiente, no siempre son contabilizadas en las estadísticas oficiales.

En conclusión, si bien Leticia presenta un indicador de generación de residuos per cápita superior al promedio nacional, es necesario realizar un análisis más profundo para comprender las razones detrás de esta cifra y evaluar la efectividad de las estrategias de gestión de residuos implementadas en la ciudad. Factores como la cobertura del servicio de aseo, las prácticas de aprovechamiento de residuos y el consumo per cápita deben ser considerados para diseñar políticas públicas más adecuadas y sostenibles.

De acuerdo con el PGIRS de 2005, la generación diaria de residuos sólidos de vidrio en la ciudad asciende a 0,64 toneladas diarias, lo que equivale a aproximadamente 19,2 toneladas mensuales y 230 toneladas anuales (Actualización Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), n.d.). Este volumen de vidrio residual representa una oportunidad significativa para promover la economía circular y la sostenibilidad, ya que podría ser utilizado como sustituto parcial de los agregados finos en diversas aplicaciones de construcción, contribuyendo así a prolongar la vida útil del relleno sanitario.

Tabla 3.1. Caracterización de residuos sólidos en Leticia % tonelada

MATARIAL	PORCENTAJE
Materia Orgánica	53,6
Otros	3,3
Huesos	1
Ladrillo	0,8
Cuero	0,2
Textiles	1,5
Madera	4,5
Vidrio	6,4
Papel y Cartón	16,3
Plásticos y Cauchos	11,2
Poliestirenos	0,2
Metales	1

Fuente; PGIRS[6] 2005

3.2. Marco normativo y regulatorio para la implementación del uso de vidrio como agregado artificial en el concreto

Se considera factible integrar el vidrio a la cadena productiva del concreto de manera sostenible, y en función de propender por una economía autóctona y circular teniendo como marco normativo el siguiente:

- **Ley 99 de 1993**: Crea el Ministerio del Medio Ambiente, reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA. Bajo este marco normativo se define el desarrollo económico y social en torno a la sostenibilidad, define los parámetros de la protección de la biodiversidad y establece la incorporación de costos ambientales y el uso de instrumentos

[6] Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Documento de diagnóstico socioeconómico. Leticia, 2005. P. 35-36

económicos para la prevención, corrección y restauración de los deterioros ambientales.

- **Resolución 754 de 2014**: Define metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- **Ley 1259 de 2008**: Establece la aplicación del comparendo ambiental en el territorio nacional, con el fin de promover la cultura ciudadana en torno al buen manejo y disposición de los residuos en Colombia.
- **Resolución 1257 de 2021**: Del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones. La resolución promueve el cierre de ciclos de materiales, el aprovechamiento de subproductos e impone requisitos de trámite. La resolución consagra las medidas mínimas de manejo ambiental en sitios de disposición final de RCD, reglamenta el programa de manejo ambiental de RCD y las obligaciones de los generadores de RCD, y dispone las metas de aprovechamiento de RCD.

Si bien las leyes, decretos y resoluciones citadas en este acápite no hacen referencia específica al vidrio reciclado como agregado artificial para su uso en el concreto, en su conjunto propenden por la protección del medio ambiente, promueven la economía circular y el aprovechamiento de subproductos por medio del fomento del desarrollo sostenible. Por tanto, se podría considerar que, para integrar el uso del vidrio como AVR a una cadena productiva sustentable y sostenible en el tiempo, se deben seguir los siguientes pasos:

- **Estudio, evaluación y aprobación**: Es necesario realizar los estudios técnicos necesarios para demostrar la viabilidad del uso del vidrio como agregado (AVR), estos estudios deberán ser aprobados por las autoridades competentes con el fin de maximizar sus beneficios.
- **Integración con programas ambientales**: Los generadores de RCD pueden incluir el uso del vidrio en sus programas de manejo ambiental y/o licencias ambientales, garantizando así la aplicación de las mejores prácticas y normas técnicas.

- **Integración con Plantas de Aprovechamiento**: Integrar los procesos de beneficio del vidrio como agregado artificial a los procesos desarrollados en plantas de aprovechamiento de RCD, con el fin de generar mayor diversidad de agregados artificiales adecuados para el uso en la producción de concretos y morteros.
- **Cumplimiento de metas de aprovechamiento:** Procurar que las iniciativas en torno a el AVR sean incluidas en las metas de aprovechamiento establecidas en la Resolución 1257 de 2021.
- **Educación y sensibilización**: Promover campañas de educación y sensibilización sobre los beneficios del uso del AVR en procura de fomentar su adopción por parte de la industria de la construcción.
-

Integrar el uso del vidrio como AVR en la producción de concreto no solo ayuda a reducir la cantidad de residuos que terminan en los vertederos y/o rellenos sanitarios, sino que también puede disminuir los costos de producción, promover la sostenibilidad en la construcción y de reducir la demanda de agregados convencionales.

3.3. Implicaciones económicas del uso del concreto con agregados de vidrio reciclado

Para determinar la estructura de costos de producir un metro cubico de concreto de 21 MPa elaborado a partir de la sustitución de agregados convencionales por agregados provenientes del reciclaje de vidrio (AVR) en los diferentes porcentajes de sustitución analizados en esta investigación, se tuvieron en cuenta los precios de las materias primas que se tienen en la ciudad de Medellín para enero de 2025 y, para determinar el precio de AVR procesado y/o trasformado, se emplearon los análisis realizado en los proyectos de implementación de tecnologías apropiadas, desarrollados tanto en Leticia en el año 2011 como la isla de San Andrés en el año 2017, actualizando sus costos al años 2025 (ver tablas anexas, autor de las tablas (Velásquez, B., JD.; 2025)).

3.4. Análisis de costo de producción de 1 m^3 de agregado artificial a partir del aprovechamiento de vidrio (AVR)

Tabla 3.2. Análisis de precio unitario para la elaboración de 1 m^3 de arena de vidrio AVR

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
ACTIVIDAD:	**ELEBORACION AGREGADO DE VIDRIO RECICLADO**					
ITEM:						
FECHA	**8/01/2025**				**UND:**	**M3**
			TOTAL, COSTO DIRECTO			**$ 267.027,51**
1	**MATERIALES**					
Nº	**DESCRIPCIÓN**	**UNIDAD**	**CANT**	**VR. UNITARIO**	**VR PARCIAL**	
1	Botellas vidrio	kg	2.551,00	100,00	255.100	
						$ 255.100,00
2	**EQUIPO**					
CANT	**DESCRIPCIÓN**	**UNIDAD**	**VR/HORA**	**HR/UN**	**VR PARCIAL**	
1	molino impacto	UNIDAD	20.250,00	0,125	2.531,25	
1	Herramienta 10% M, O	UNIDAD	8.542,05	0,10	854,21	
						$ 3.385,46
4	**MANO DE OBRA**					
trabajadores	**JORNAL HORA**	**PREST. 56%**	**JORN TOTAL**	**RENDIMIENTO**	**VR PARCIAL**	
cuadrilla 1	43.805	24.531	68.336	0,13	8.542,05	
						$ 8.542,05
			TOTAL, COSTO DIRECTO M^3			**267.028**
			TOTAL, COSTO DIRECTO kG (2510 kg/m^3)			**106,39**

Para analizar el costo directo de producir un metro cubico de AVR, se tiene como base de análisis los equipos desarrollados para el proyecto en la isla de San Andrés, en donde se configuró un proceso lineal para la trituración, la clasificación granulométrica del vidrio y el acopio, por medio de un sistema que contaba con banda de recepción de 4 ml, molino de impacto o martillos y trómel clasificador, equipos que en trabajo combinado presentaron un rendimiento nominal de 3.5 metros cúbicos hora, aclarando que el proceso de alimentación del sistema se configuró para hacerlo manualmente.

No obstante, el rendimiento en estos equipos depende sustancialmente de la velocidad de alimentación del sistema.

En este orden de ideas, obtenemos los siguientes resultados:

- Costo directo del m^3 de AVR = $ 267.028 m^3
- Costo directo del kg de AVR= $ 106.39 kg (densidad nominal 2510 kg/m^3)

A partir del subanálisis de precio unitario, para determinar el valor del metro cubico de agregado de vidrio (AVR), se realizó el análisis de precios para la elaboración de un metro cúbico de concreto de 21 MPa bajo los parámetros del diseño de mezclas empleado como referencia o patrón, y los posteriores análisis de cada uno de los porcentajes de sustitución analizados, obteniendo el siguiente resultado:

3.5. Análisis de costo de producción de 1 m³ de concreto de 21 MPa

ACTIVIDAD: **ELEBORACION CONCRETO 21 Mpa x m³**

ITEM:

FECHA **8/01/2025** **UND: m³**

TOTAL, COSTO DIRECTO	**$ 664.618,07**

1 MATERIALES

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	**CANT**	**VR. UNITARIO**	**VR PARCIAL**	
1	Cemento UE	kg	350,00	836,00	292.600	
2	A. Fino	kg	1.047,00	146,000	152.862,00	
3	A. Grueso	m³	858,36	164	140.771,04	
4	Agua	LTS	175,00	100,00	17.500,00	
						$ 603.733,04

2 EQUIPO

CANT	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	**VR/HORA**	**HR/UN**	**VR PARCIAL**	
1	mezcladora	UNIDAD	9.015,00	0,5	4.507,50	
1	Herramienta 10% M, O	UNIDAD	51.252,30	0,10	5.125,23	
						$ 9.632,73

3 TRANSPORTE

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	**VR. UNITARIO**	**HR/UN**	**VR PARCIAL**	
	TRANSPORTE	GL			-	

4 MANO DE OBRA

trabajadores	JORNAL HORA	PREST. 56%	**JORN TOTAL**	**RENDIMIENTO**	**VR PARCIAL**	
cuadrilla 1	43.805	24.531	68.336	0,75	51.252,30	
					-	
						$ 51.252,30

TOTAL, COSTO DIRECTO	**664.618**

3.6. Análisis de costo de producción de 1 m³ de concreto de 21 MPa con sustitución del 10% del agregado convencional por AVR

ACTIVIDAD: **ELEBORACION CONCRETO 21 Mpa 10% SUT EN m³**

ITEM:

FECHA **8/01/2025** **UND: m³**

TOTAL, COSTO DIRECTO	**$ 649.281,37**

1 MATERIALES

Nº	DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANT	VR. UNITARIO	VR PARCIAL	
1	Cemento UE		kg	350,00	836,00	292.600	
2	A. Fino		kg	856,70	146,000	125.078,20	
3	A. Artificial (AVR)		Kg	117,00	106,385	12.447,10	
4	A. Grueso		m³	858,36	164	140.771,04	
5	Agua		LTS	175,00	100,00	17.500,00	
							$ 588.396,34

2 EQUIPO

CANT	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR/HORA	HR/UN	VR PARCIAL	
1	mezcladora	UNIDAD	9.015,00	0,5	4.507,50	
1	Herramienta 10% M, O	UNIDAD	51.252,30	0,10	5.125,23	
						$ 9.632,73

3 TRANSPORTE

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	HR/UN	VR PARCIAL	
	TRANSPORTE	GL			-	

4 MANO DE OBRA

trabajadores	JORNAL HORA	PREST. 56%	JORN TOTAL	RENDIMIENTO	VR PARCIAL	
cuadrilla 1	43.805	24.531	68.336	0,75	51.252,30	
					-	
						$ 51.252,30

TOTAL, COSTO DIRECTO		**649.281**

3.7. Análisis de costo de producción de 1 m³ de concreto de 21 Mpa con sustitución del 25 % del agregado convencional por AVR

ACTIVIDAD: **ELEBORACION CONCRETO 21 Mpa 25% SUT EN m³**

ITEM:

FECHA **8/01/2025** **UND: m³**

TOTAL, COSTO DIRECTO	$ 626.213,69

1 MATERIALES

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VR. UNITARIO	VR PARCIAL	
1	Cemento UE	kg	350,00	836,00	292.600	
2	A. Fino	kg	570,77	146,000	83.332,42	
3	A. Artificial (AVR)	Kg	292,57	106,385	31.125,19	
4	A. Grueso	m3	858,36	164	140.771,04	
5	Agua	LTS	175,00	100,00	17.500,00	
						$ 565.328,65

2 EQUIPO

CANT	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR/HORA	HR/UN	VR PARCIAL	
1	mezcladora	UNIDAD	9.015,00	0,5	4.507,50	
1	Herramienta 10% M, O	UNIDAD	51.252,30	0,10	5.125,23	
						$ 9.632,73

3 TRANSPORTE

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	HR/UN	VR PARCIAL	
	TRANSPORTE	GL			-	

4 MANO DE OBRA

trabajadores	JORNAL HORA	PREST. 56%	JORN TOTAL	RENDIMIENTO	VR PARCIAL	
cuadrilla 1	43.805	24.531	68.336	0,75	51.252,30	
					-	
						$ 51.252,30

TOTAL, COSTO DIRECTO	626.214

3.8. Análisis de costo de producción de 1 m³ de concreto de 21 MPa con sustitución del 35 % del agregado convencional por AVR

ACTIVIDAD: **ELEBORACION CONCRETO 21 Mpa 35% SUT EN M3**

ITEM:

FECHA **8/01/2025** **UND: M3**

TOTAL, COSTO DIRECTO	$ 610.881,76

1 MATERIALES

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VR. UNITARIO	VR PARCIAL	
1	Cemento UE	kg	350,00	836,00	292.600	
2	A. Fino	kg	380,51	146,000	55.554,46	
3	A. Artificial (AVR)	Kg	409,56	106,385	43.571,23	
4	A. Grueso	m3	858,36	164	140.771,04	
5	Agua	LTS	175,00	100,00	17.500,00	
						$ 549.996,73

2 EQUIPO

CANT	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR/HORA	HR/UN	VR PARCIAL	
1	mezcladora	UNIDAD	9.015,00	0,5	4.507,50	
1	Herramienta 10% M, O	UNIDAD	51.252,30	0,10	5.125,23	
						$ 9.632,73

3 TRANSPORTE

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	HR/UN	VR PARCIAL	
	TRANSPORTE	GL			-	

4 MANO DE OBRA

trabajadores	JORNAL HORA	PREST. 56%	JORN TOTAL	RENDIMIENTO	VR PARCIAL	
cuadrilla 1	43.805	24.531	68.336	0,75	51.252,30	
					-	
						$ 51.252,30

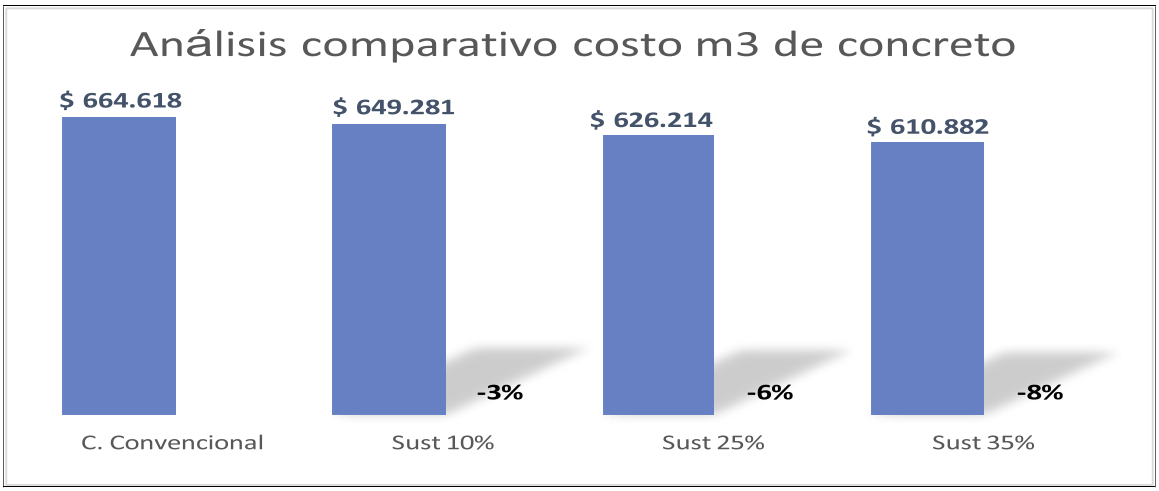
TOTAL, COSTO DIRECTO	610.882

Tabla 3.3. Análisis comparativo costo de producción de 1m^3 de concreto simple Vs concretos con diferentes % de sustitución

Concreto 21 MPa con AVR x m^3			
Convencional	**Sustitución 10%**	**Sustitución 25%**	**Sustitución 35%**
$664 618	$649 281	$626 214	$610 882

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.1. Análisis comparativo costo de producción de 1m^3 de concreto simple Vs concretos con diferentes % de sustitución (Página siguiente)



A partir del análisis comparativo de producción de un metro cubico de concreto convencional y los costos asociados a producir el mismo volumen, pero con los porcentajes de sustitución analizados en la investigación, se pude concluir que el concreto convencional presenta un costo más alto ($ 664 618/m^3), mientras que el de mayor porcentaje de sustitución (35%) es el que presenta menor costo ($610 882/m^3).

Lo anterior sugiere que, a mayor porcentaje de sustitución, el costo del concreto confeccionado a partir de AVR disminuye su costo, es decir, que se presenta una relación inversamente proporcional entre costo y % de sustitución.

En resumen, la sustitución de agregados naturales por AVR es una estrategia efectiva para reducir el costo de producción del concreto, sin embargo, es necesario profundizar en la investigación del modelo de producción y/o negocio, en aras de generar iniciativas de tecnologías adecuadas a las particularidades de cada proyecto productivo.

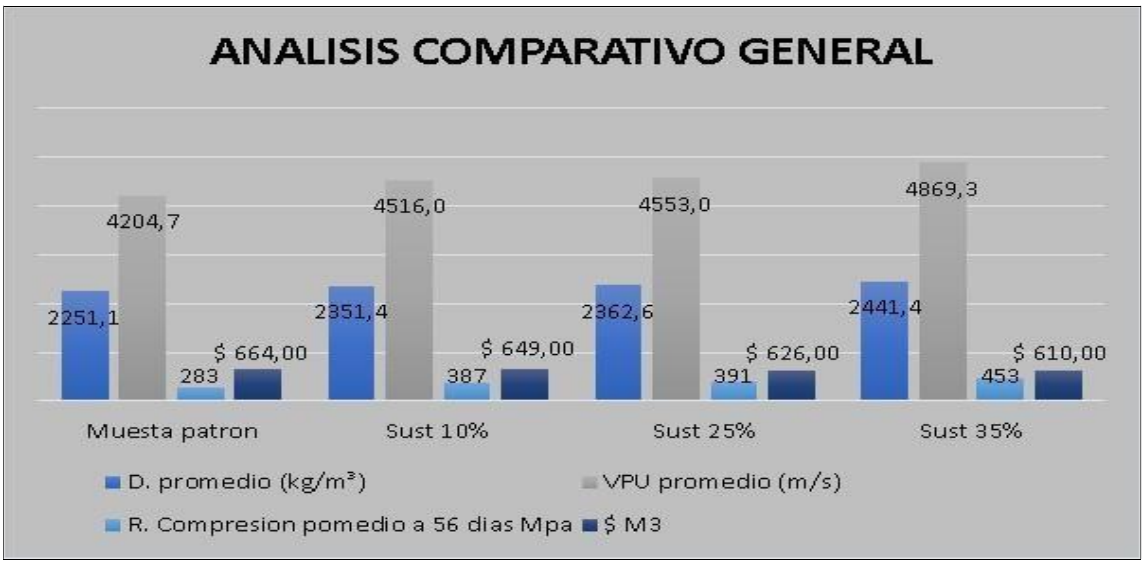
3.1. Análisis general de factibilidad general del concreto con (AVR)

Tabla 3.4. Análisis comparativo general

Análisis comparativo general				
Mezcla	Densidad (kg/m^3)	VPU (m/s)	F´c 56 días (MPa)	$/m^3
Patrón	2251,1	4204,7	28,3	664 618
Sust. 10%	2351,4	4516,0	38,7	649 281
Sust. 25%	2362,6	4553,0	39,1	626 214
Sust. 35%	2441,4	4869,3	45,3	610 882

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.2. Análisis comparativo general



Nota: Para efectos de generar el grafico de comparación, los MPa se asumieron como una cifra entera sin punto decima

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

Los concretos confeccionados a con AVR se presentan como un material promisorio, no solo por su desempeño, sino también por su potencial en aportar a las cadenas productivas de la región y su innegable potencial para mitigar los problemas ambientales que se presentan allí.

La iniciativa del AVR no solo es viable, sino también deseable, considerando la creciente presión antrópica que se presenta sobre los ecosistemas amazónicos y la necesidad de dar soluciones desde la sostenibilidad.

Los procesos desarrollados en esta investigación reafirman la importancia de adoptar una mirada más holística al abordar los desafíos de desarrollo económico, con la necesidad de integrar a esta mirada los aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales, desde la óptica de diversas disciplinas.

El AVR se presenta como una alternativa factible para reducir la dependencia de agregados convencionales, cuyo proceso de extracción genera impactos ambientales negativos y su empleo en la producción de concreto implica altos costos, calidades deficientes y patologías.

La implementación del uso del AVR dentro de un contexto de tecnología apropiada constituye un factor clave para garantizar la calidad del material y optimizar la sustentabilidad de los procesos productivos, configurando economías circulares a escala.

Es fundamental continuar investigando sobre el comportamiento de los concretos confeccionados a partir del AVR a lo largo del tiempo (durabilidad), así como su desempeño en condiciones ambientales extremas para determinar su real durabilidad y potenciar su aplicación a diversos tipos de proyectos.

La participación de la comunidad y los actores del sector de la construcción son esenciales para lograr el éxito del concreto confeccionado a partir de AVR, generando conciencia sobre sus beneficios y promoviendo su uso en el sector público y privado.

Si bien la normativa técnica colombiana no hace referencia explícita en el uso del vidrio como agregado, sí establece un marco propicio para la implementación de esta tecnología, como ya se ha hechos con los escombros (RCD).

La investigación trasciende el ámbito técnico y se conecta a una problemática socio ambiental de Leticia, como lo es la gestión de residuos y la posible relación entre la minería de agregados para concreto y la minería ilegal de oro.

El uso propuesto para el vidrio producto del posconsumo se alinea con los principios de la economía circular y la sostenibilidad al promover el reciclaje y la reutilización de materiales y/o residuos, en consecuencia, reduce la presión sobre los recursos naturales no renovables.

Se requiere continuar explorando el uso potencial del vidrio reciclado como agregado para desarrollar nuevas tecnologías y materiales que contribuyan al desarrollo de una construcción más sostenible.

4.1. Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de aspectos que se podrían abordar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada.

- Hacer estudios de análisis de ciclo de vida (ACV), para medir el impacto ambiental del concreto con AVR en comparación con el concreto convencional, considerando todas las etapas del proceso productivo.

- Proponer el desarrollo de normas técnicas y estándares de calidad para el AVR y su uso en la producción de concretos y morteros que garanticen la seguridad, durabilidad y desempeño.

- Desarrollar programas de trasferencia tecnológica dirigidos a los sectores que puedan implementar proyectos dirigidos al manejo y uso del AVR en la producción de concreto, así como sobre las mejores prácticas ambientales en la construcción.

- Procurar la inclusión del AVR en los proyectos públicos y privados, como una forma de impulsar su uso y generar demanda.

- Desarrollar estudios de costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica de la producción de concreto con AVR a gran escala, considerando los costos de procesamiento del vidrio, transporte y otros factores relevantes.

- Promover la investigación y el desarrollo de tecnologías adecuadas que permitan mejorar la eficiencia del procesamiento del vidrio para su uso como AVR.

4.2. Propuestas de futuras investigaciones

- Evaluación del desempeño de los concretos confeccionados con AVR en condiciones extremas, como altas temperaturas, humedad, ambientes salitres o marinos y en contactos con agentes químicos agresivos.

- Exploración del comportamiento de los concretos confeccionados con AVR a largo plazo y la respectiva evaluación de su durabilidad y vida útil.

- Explorar el potencial del vidrio reciclado como material cementante alternativo.

- Análisis del ciclo de vida de los concretos (ACV-C) como parámetro de viabilidad de los ecosistemas urbanos en el Amazonas Colombiano.

Bibliografía

Actualización Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). (n.d.). www.leticia-amazonas.gov.co

Departamento Nacional de Planeación (DPN)+Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2023). *Informe nacional de disposición final de residuos sólidos*.

Fla Vio, I., & Castillo, A. (n.d.). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO (TEORIA Y PROBLEMAS)*.

Galves Galvis, R. A. (2022). *Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimentos*.

García Moreno, G. (1987). *Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón*.

Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC). (1995a). *Norma técnica Colombiana 78*.

Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC). (1995b). *Norma técnica colombiana 92: determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados.*

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (1995). *Norma técnica ntc colombiana 237: método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2007). *Norma técnica NTC Colombiana 77 concretos. "Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. (2010). *Norma técnica Colombiana NTC 673*.

Instituto Colombiano de Normas técnicas (ICONTEC). (2014). *Norma técnica Colombiana 121*.

Padilla, B. A., Paul, J., Rengifo Salazar, B., Asesor, A., Ing, M., Chavarría, R., & Liliana, J. (2019). *Hormigón reforzado con vidrio molido y su relación con la resistencia a la compresión para controlar grietas y fisuras por contracción plástica*.

Paredez Benzu, A. (2019). *Análisis de la resistencia a la compresión del concreto F"c=210 kg/cm2 con adición de vidrio reciclado*.

Revista Cemento y Concreto. (2021). *The global cement report 2021*.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y el mortero* (Bhadar editores, Ed.; 5th ed.).

Vidaud Quintana, E. de J. (2016). *Ultrasonido: Aplicaciones para la determinación del módulo de elasticidad dinámico*.

Bedriñana Garamendi, M. N., & Yoctun Rios, R. R. (2024). Influencia del vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del concreto autocompactante y la capacidad de uso en la ciudad de Ayacucho. Revista Gaceta Técnica, 25(2), 74-89

"Diseño de Concreto Portland f'c= 210 kg/cm2 Adicionando Vidrio Molido para Incrementar la Resistencia a la Compresión La Libertad - 2022" (p. 54), por A. L. Abanto Rodríguez y J. S. Gil Dilas, 2022, [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]

Abanto Rodriguez, A. L., & Gil Dilas, J. S. (2022). "Diseño de Concreto Portland f'c= 210 kg/cm2 Adicionando Vidrio Molido para Incrementar la Resistencia a la Compresión La Libertad - 2022" [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].

Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. Á., & Zamora Mondragón, J. E. (2022). Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. Revista Universidad y Sociedad, 14(1), 179-192.