

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

trabajo de grado para la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

CONCRETO ARQUITECTÓNICO CON MATERIALES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

AUTORES:
Jeferson Stiven Carlosama Imbachi
Yordan Javier Chates Bravo

DIRECTOR:
William Gustavo Valencia Saavedra, Ph.D

CODIRECTORA:
Ruby Mejía de Gutiérrez, M.Sc., Ph.D

GRUPO DE INVESTIGACIÓN MATERIALES COMPUESTOS
(Escuela de Ingeniería de Materiales)

Santiago de Cali, abril 2025

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 1
1. INTRODUCCIÓN 2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
2.1. Tema: 3
2.2. Descripción del problema 3
2.3. Formulación 4
3. OBJETIVOS 5
3.1. Objetivo General 5
3.2. Objetivos específicos 5
4. MARCO REFERENCIAL 6
4.1. Marco teórico 6
4.1.1. Concreto: 6
4.1.2. Concreto Arquitectónico: 6
4.1.3. Componentes del concreto 8
4.1.4. Residuos de la construcción y de la demolición (RCD) 9
4.2. Antecedentes 10
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 18
5.1. FASE I: Recopilación de información, selección de tipo de residuos y caracterización de los residuos seleccionados 18
5.1.1. Recopilación de información 18
5.1.2. Selección de materiales 18
5.1.3. Caracterización de los materiales 19
5.1.4. Selección de materiales colorantes o pigmentos. 20
5.2. FASE II: Diseño y producción de microconcreto arquitectónico para la evaluación de propiedades. 22
5.2.1. Producción de microconcretos 22
5.2.2. Ensayos en estado fresco y endurecido 22
5.3. FASE III: Diseño y producción de concretos arquitectónicos para la evaluación de propiedades 23
5.3.1 Producción de concretos 23
5.3.2. Ensayos en estado fresco y endurecido 23
5.4. Fase IV: Validar el potencial de aplicación. 24
5.5. FASE V: Redactar el documento final del trabajo de grado. 24

6. RESULTADOS Y ANALISIS 25
6.1. FASE I: Recopilación de información, selección de tipo de residuos y caracterización de los residuos seleccionados 25
6.1.1. Selección de materiales 25
6.1.2. Caracterización de los materiales 25
6.2. FASE II: Diseño y producción de microconcreto arquitectónico para la evaluación de propiedades 43
6.2.1. Producción de microconcretos 43
6.2.2. Evaluación de propiedades de los Microconcretos. 44
6.3. FASE III: Diseño y producción de concretos arquitectónicos para la evaluación de propiedades 49
6.3.1. Producción de concretos 49
6.3.2. Preparación de Concretos 54
6.3.3. Resultados de ensayos en estado fresco y endurecido para las mezclas de concreto 56
6.4. Fase IV: Validación del potencial de aplicación. 68
7. CONCLUSIONES 72
8. BIBLIOGRAFÍA 74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Concreto Arquitectónico, Fuente: (Novacasa,2021) 7
Figura 2: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Fuente: (Universidad del Norte, 2017) 9
Figura 3: Pigmentos en el concreto, Fuente: (Revista Novarq,2021) 10
Figura 4: Comparación de los diferentes materiales no convencionales, Fuente: tesis. Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Pag 34 13
Figura 5: Distribución tamaño de grano, Fuente: Mansour, G. Shamsabadi, E.A. Khodabakhshian, A. Sourmeh, F. Brito, J. (2019). Fig1 14
Figura 6: Resistencia a la compresión, Fuente: Caicedo Moreno, E. Del Alamo Abanto, J. (2015). Gráfico 31 16
Figura 7: Acabado Superficial, Fuente: Caicedo Moreno, E., Del Alamo Abanto, J. (2015). Imagen 6. 16
Figura 8: Metodología experimental, fuente: Elaboración propia 18
Figura 9: Polvo RL y Polvo Rce Fuente: Vallejo Paredes, C. Villota Coral, J. 2023, Fig.5 19
Figura 10: Espectrofotómetro modelo Ci6X, marca X-RITE. 20
Figura 11: Espacio de color CIELAB, Fuente López, A., & Di Sarli, A. R. (2016), figura 1. 21
Figura 12: Mezclas de Microconcretos en la cámara de curado. 22
Figura 13: Molde en silicona para brindar la textura a las aplicaciones de Concreto Arquitectónico. 24
Figura 14: Curvas de distribución del tamaño de partículas del Rce y RL. Tomada y modificada de (Robayo, R. 2020). 26
Figura 15: Curvas granulométricas de los agregados gruesos 27
Figura 16: Botellas verdes reciclados, para utilizarlas como agregado fino. 30
Figura 17: Curvas granulométricas de los agregados finos. 31
Figura 18: Resultados del ensayo de impurezas orgánicas, a) arena. b) Vidrio. 33
Figura 19: a) Pastas con reemplazo de Rl del 30 % y usando una relación de líquidos sobre solidos del 0,35. b) Pastas con reemplazo de Rl del 30 % y usando una relación de líquidos sobre solidos del 0,40 35
Figura 20: Resistencia a Compresión de pastas a 7 y 28 días. 36
Figura 21: Índice de Actividad Puzolánica para las muestras de ensayo. 37
Figura 22: Valores promedios de a*, b*, L* para cada pasta. 39
Figura 23: a* vs b* de cada pasta. 40
Figura 24: Variación de Saturación y Luminosidad de cada pasta. 40

Figura 25: Comparación de resultados de resistencia a la compresión para las Mezclas de microconcretos..... 46
Figura 26: Comparación de Succión capilar para cada muestra de Microconcreto 48
Figura 27: Resultados a Compresión de cilindros de prueba a 7 días. 50
Figura 28: Ajuste granulométrico de Fuller y Thomson. 53
Figura 29: mezcladora horizontal 55
Figura 30: Apisonamiento de la mezcla CAAN, en los moldes de placas. 55
Figura 31: Cilindros con la mezcla CAAN. 56
Figura 32: Mezcla CAARV, Asentamiento: 15 cm..... 58
Figura 34: Cilindros CAAN 58
Figura 33: Cilindros CAAR..... 58
Figura 36: Cilindros CAARRce 59
Figura 35: Cilindros CAARRL 59
Figura 37: Cilindros CAARV..... 59
Figura 38: Comparación de resultados de resistencia a la compresión para las Mezclas de concretos. 63
Figura 39: Comparación de resistencias a tracción indirecta para las muestras de concreto. 64
Figura 40: Comparación de Succión capilar para cada mezcla de concreto. 67
Figura 41: Maquina Universal, en el ensayo a flexión de la placa de la mezcla CAAN..... 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Compuestos químicos. Fuente: Sánchez de Guzmán, 1996, Capitulo 2 8

Tabla 2: Tamaño de los agregados. Fuente: (Sánchez De Guzmán, 1996) 9

Tabla 3: Muestras Analizadas, Fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page 1, table 1 11

Tabla 4: Proporciones de mezcla para concreto C25, Fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page. 5, table 6.. 12

Tabla 5: Cargas ultimas alcanzadas en los ensayos a compresión, fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page. 7, table 7 12

Tabla 6: Comparación de resistencias a la compresión, Fuente: tesis. Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Pag 34 13

Tabla 7: Composición química de Rce y RL (%). 26

Tabla 8: Resultados de densidad por picnómetro de Helio. 26

Tabla 9: Resultados de Masa Unitaria, para agregados gruesos 28

Tabla 10: Resultados de Densidad y Absorción para agregados gruesos. 29

Tabla 11: Resultados de Desgaste de los agregados gruesos. 29

Tabla 12: Tamaños obtenidos del vidrio después de pasar por la máquina. 30

Tabla 13: Resultados de Masa Unitaria, para agregados finos. 32

Tabla 14: Resultados de Densidad y Absorción para agregados finos. 32

Tabla 15: Ficha técnica del superplastificante Sika ViscoCrete WR-2020. Fuente: Sika (2019) 34

Tabla 16: Resultados de los diámetros obtenidos en la mesa de flujo. 35

Tabla 17: Cubos elaborados en la producción de pastas para el ensayo de coloración a 28 días de curado. 38

Tabla 18: Valores promedios de L*, a*, b*, C* y h* en las mezclas de pastas. 39

Tabla 19: Diferencias de color total ΔE*76 de las mezclas con diferentes porcentajes de Rce. 41

Tabla 20: Diferencias de color total ΔE*76 de las mezclas con diferentes porcentajes de RL. 42

Tabla 21: Diferencias de color total ΔE*76 entre las mezclas con Rce y RL en los mismos porcentajes de adición. 42

Tabla 22: Dosificaciones de los microconcretos a diseñar. 43

Tabla 23: Mezclas de Microconcretos, después de la meza de flujo. 44

Tabla 24: Falla por compresión en las mezclas de microconcretos diseñadas. 45

Tabla 25: Resultados del ensayo densidad, absorción y porosidad en mezclas de microconcreto a los 28 días de curado. 48

Tabla 26: Tasa de absorción y coeficiente de correlación lineal correspondientes a los microconcretos 49

Tabla 27: Parámetros de diseño para los concretos. 50

Tabla 28: Trabajabilidad y modo de falla de cilindros de prueba. 51

Tabla 29: Dosificación de las mezclas de concreto. 53

Tabla 30: Ensayo de asentamiento. 57

Tabla 31: Falla por compresión en las mezclas de concretos diseñadas 60

Tabla 32: Resultados del ensayo densidad, absorción y porosidad en mezclas de concreto a los 28 días de curado 66

Tabla 33: Tasa de absorción y coeficiente de correlación lineal correspondientes a los concretos 67

Tabla 34: Resultados a flexión de las placas de concreto 68

Tabla 35: Aplicaciones finales diseñadas (Placas tipo muretes). 70

Tabla 36: Aplicaciones finales diseñadas (Cenefa). 71

RESUMEN

Palabras claves: Materiales no convencionales y convencionales, concreto arquitectónico, vidrio, Residuo de Cerámica, Residuo de Ladrillo.

El proyecto se enfocó en el desarrollo de concreto arquitectónico sostenible mediante la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) como componentes esenciales en la elaboración de mezclas. Los materiales principales empleados fueron residuos de cerámica (RCe), ladrillo (RL) y vidrio reciclado, seleccionados por sus propiedades físicas y químicas que permiten su uso como sustitutos parciales del cemento y de los agregados convencionales. Este enfoque responde a la necesidad actual de disminuir costos de producción, reducir el impacto ambiental del sector y ofrecer materiales con una estética mejorada.

El trabajo se llevó a cabo en cinco fases metodológicas. En la primera, se realizó la selección y caracterización de los residuos, evaluando granulometría, reactividad química y propiedades mecánicas. En la segunda fase, se diseñaron mezclas de concreto con hasta un 20% de RCD, optimizando proporciones para lograr buena trabajabilidad, resistencia y estética. Estas mezclas incluyeron pigmentos naturales derivados de los residuos, logrando acabados únicos en color y textura.

Durante la tercera fase, se realizaron ensayos para determinar resistencia a la compresión y tracción, porosidad y uniformidad del acabado. Los resultados mostraron mejoras notables en propiedades mecánicas y visuales. La cuarta fase consistió en la elaboración de prototipos reales, como placas decorativas y muretes, que demostraron su aplicabilidad práctica. Finalmente, se analizaron los datos, estableciendo relaciones entre proporciones de RCD, propiedades del concreto y su viabilidad económica y ambiental.

El estudio validó el potencial del concreto desarrollado como una alternativa sostenible, estética y funcionalmente competitiva en el mercado de la construcción.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto se ha consolidado como uno de los principales materiales utilizados en el sector de la construcción, siendo de gran importancia para la construcción social al generar estructuras habitables cumpliendo con los requisitos de seguridad, ambientales y estéticos. Cabe anotar que, anteriormente solo se consideraban las propiedades estructurales del concreto, sin tener en cuenta sus características de acabado, textura y apariencia; pero debido al alto precio en algunos materiales para proporcionar revestimiento o un acabado estético a la construcción, el sector de la construcción se ha visto en el reto de implementar nuevas soluciones para generar acabados superficiales, resaltando la calidad estética, y disminuir así el costo de los acabados tradicionales.

Surge entonces el denominado Concreto Arquitectónico, cuyo uso es posible en exteriores (fachadas, pisos, mobiliario urbano) al igual que como decoración en espacios interiores (pisos, muros). Mediante este tipo de concreto es posible obviar los acabados superficiales, tales como pinturas, reduciendo, en general, los costos finales de la obra. Además, se pueden usar en su diseño diversos tipos de materiales, tanto naturales como residuos industriales y residuos de construcción, que aporten tonalidades blancas, ocres, rojas, entre otras, y/o otorguen texturas variables, esto último puede ser mediante tratamientos superficiales del concreto recién colocado o mediante el uso de formaletas especiales o herramientas apropiadas.

Por ello, el concreto arquitectónico no solo cuenta con características de durabilidad y resistencia, sino que también permite generar diversas formas y texturas, aportando un estilo estético y de confort al terminado de la estructura. Los acabados pueden ser directos, cuando al retiro de la formaleta la superficie del concreto queda con algún tipo de patrón, textura o incrustación o color dando apariencia diferente a la del concreto convencional, y acabado indirecto cuando posteriormente a la colocación del concreto, pero aun en estado fresco, se utilizan métodos químicos o físicos (mecánicos) para dar un acabado acanalado, cepillado o texturizado al concreto. En cualquier caso, la superficie final resalta el potencial estético del concreto. La norma o guía que está relacionada con la fabricación y manejo de este tipo de concreto es la ACI 303 – ACI – SP - 15. Concreto Arquitectónico.

El presente trabajo de grado desarrollo un concreto arquitectónico empleando materiales convencionales y no convencionales (residuos industriales y de construcción) que, cumpliendo con las características físico mecánicas exigidas para un concreto estructural y no-estructural, tuvo un acabado superficial coloreado o texturizado, para lo cual se utilizaran materiales diversos aplicando tratamientos de acabado directo o indirecto.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Tema:

"Concreto Arquitectónico con materiales convencionales y no Convencionales -Diferentes colores y texturas-"

2.2. Descripción del problema

Uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de la vida y la construcción social es el aspecto visual que el mundo exterior nos pueda brindar, y es que el estar rodeado de un mundo brillante, llamativo y lleno de colores nos ayuda como individuos racionales y emocionales a reconocer nuevas pistas de determinados lugares, a encontrar nuevos caminos, y a entender el entorno con base en múltiples miradas. Dentro de nuestro entorno, los elementos que permiten obtener un aspecto visual son las infraestructuras, aquellas que, además de cumplir requisitos de seguridad, funcionales y ambientales, deben contemplar la funcionalidad visual, esa que garantice la calidad estética y visual de la obra; como lo son su forma, textura, iluminación, y colores en concordancia a su entorno.

Sin embargo, la calidad estética de una infraestructura no deja de representar un objetivo más en el proyecto, aquel que va a generar que el presupuesto de la construcción aumente y es que garantizar un aspecto estético y habitable dentro una obra implica la utilización de materiales como el yeso, cerámica, madera, impermeabilizantes, pinturas, ladrillos, vidrios especiales, y otros materiales. Aunque estos materiales desarrollan funciones importantes dentro del proyecto civil, como proteger la obra negra y proporcionar belleza y confort, no dejan de representar un importante aumento en el costo de la construcción, ya que implica realizar una inversión para cada producto y encontrar la mano de obra calificada para la aplicación del mismo, la cual no siempre es barata. Según el DANE, los factores que más influyeron en el aumento de los costos en la construcción de edificaciones en el año 2022 fueron: el precio de los materiales, aportando 0,75 puntos porcentuales de la variación total considerando que ocupan un 54,01 % del costo total de la construcción, y la mano de obra con un peso de 0,57 puntos porcentuales que representa un 21,87 % del precio total **(**DANE marzo 2022). Pero se debe aclarar que, dentro de esa variación del precio de los materiales, no sólo están involucrados los productos para realizar recubrimientos o revestimientos, sino que también se encuentran materiales utilizados en la realización de concreto como lo son sus agregados, materiales que aumentan en precio cada año. Cabe anotar que adicionalmente la producción de concreto premezclado, según el DANE, aumento en el año 2022 un 5.7% con respecto al año 2021.

Otro de los grandes problemas es el impacto ambiental generado en la fabricación de la obra y en particular en la aplicación de acabados, tales como enchapes en paredes exteriores, cocinas y baños, los cuales en las actividades de construcción, renovación y demolición, generan los residuos conocidos como residuos de construcción y demolición (RCD), (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), que en su mayor parte terminan en vertederos o lugares ilegales, ocupando espacios que podrían ser más útiles para desarrollar actividades emprendedoras para la población, además de generar efectos adversos para el

ambiente ecológico local como lo es el deterioro del suelo e incluso afectando la salud de las personas en el entorno vecino. Pero estos deterioros ambientales no solo se producen por los RCD, igualmente la explotación y deforestación de recursos naturales para la obtención de cementos y agregados para la producción de concreto generan un gran impacto ambiental, ya que se requiere un alto consumo de energía y se generan emisiones de gases de efecto invernadero.

Debido a lo anterior, todo ingeniero civil se ve en el reto de implementar en los proyectos de construcción con innovación, creatividad y calidad los diseños apropiados dentro de sus limitaciones de presupuesto y cumpliendo con una debida protección al medio ambiente. Una de las soluciones que permite obtener una estructura que cumpla con una calidad estética aceptable y que a su vez reduzca en gran medida los precios y el daño ambiental, es el uso de un concreto arquitectónico fabricado a partir del empleo de residuos y subproductos industriales. Por ejemplo, es posible el empleo de residuos tipo RCD, tal como polvo de ladrillo para darle el color a la estructura, y el reemplazo de los agregados convencionales por no convencionales utilizando residuos de construcción y demolición (RCD) o residuo de vidrio, u otros residuos como plástico reciclado, los cuales probablemente pueden ser de un precio considerablemente menor comparado con los precios de los materiales convencionales.

2.3. Formulación

¿Es posible fabricar un concreto arquitectónico utilizando materiales no convencionales, tipo residuos, que además de cumplir con las características físico-mecánicas exigidas en su diseño presente un excelente acabado superficial en cuanto a textura y color, para su uso en espacios interiores y exteriores?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Desarrollar un Concreto Arquitectónico teniendo en cuenta materiales no convencionales, que además de aportar un acabado estético cumpla con las características físico- mecánicas, y pueda ser utilizado en la fabricación de elementos de construcción tanto decorativos como estructurales.

3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y producir mezclas de concreto arquitectónico incorporando materiales no convencionales (RCD) y evaluar el efecto de su incorporación en las propiedades de desempeño de los concretos

- Generar y evaluar acabados en el concreto arquitectónico mediante la modificación de su textura utilizando diversos métodos comunes e innovadores (tratamiento superficial, tipo de molde, diseños especiales, entre otros)

- Desarrollar prototipos, tipo decorativo para espacios interiores y/o de carácter estructural para construcción, empleando el concreto arquitectónico desarrollado y demostrando así la viabilidad de su aplicación en obra.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. Marco teórico

4.1.1. Concreto:

El concreto u hormigón Portland es definido como la mezcla de un material aglutinante, con un cemento Portland, agregados o áridos (fino y grueso), agua, y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de un tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Sánchez de Guzmán, 1996, Capítulo 1). El concreto actualmente es uno de los materiales más empleado en la industria de la construcción, por su duración, resistencia, impermeabilidad, facilidad de producción y economía. Se considera que en la determinación de la calidad de concreto intervienen 200 variables, de las cuales algunas son inherentes al diseño y otras al proceso de fabricación. (Gutiérrez de López, 2003, Capítulo 2)

4.1.2. Concreto Arquitectónico:

El concreto arquitectónico de color integral es un material que además de cumplir con especificaciones estructurales y mecánicas, brinda la posibilidad de darle personalidad a una obra, combinando pigmentos para alcanzar diferentes tonos, texturas, formas y acabados a la vista. El color final del concreto es definido por el porcentaje de dosificación de los pigmentos utilizados con base en la cantidad de cemento propia de cada diseño (Cemex, 2018). Así mismo, el concreto arquitectónico es un material bastante versátil que puede lograr excelentes efectos estéticos, aportando grandes resistencias en espesores menores y en grandes formatos; también ofrece altas resistencias a la compresión, a la tensión y a la abrasión. El concreto presenta un amplio espectro de beneficios, dependiendo de los materiales, por ejemplo, cuando se incorporan algunos tipos de adiciones y/o aditivos y se utiliza en paredes y paneles puede reducir el ruido en más de un 80%, comparado con materiales como la madera o el acero. El concreto arquitectónico cumple un papel importante y primordial en las estructuras modernas, ya que este material permite dar a las construcciones posibilidades en facilidad en formas, colores y texturas en cualquier tipo de proyecto, tal y como se puede ver en la (Figura 1) (Novacasa, 2021).

Entre las ventajas del concreto arquitectónico se tiene (Novacasa, 2021).:

- Estructuras con acabados únicos y llamativos.
- Consistencias que se adaptan al diseño y a la logística de construcción (forma, cantidad de refuerzo, tipo de formaleta, acabado, etc.).
- Riguroso control de calidad de materias primas y acabados que aseguran la homogeneidad del color.
- Reducción de costos de mantenimiento y acabados adicionales.
- Disminución del tiempo de ejecución de obra.



Figura 1: Concreto Arquitectónico, Fuente: (Novacasa,2021)

Este material puede ser usado en (Novacasa, 2021):

- Vivienda.
- Fachadas de edificios institucionales, comerciales, industriales y de oficinas y muros interiores.
- Elementos arquitectónicos y artísticos.
- Mobiliario urbano y espacio público.
- Pisos interiores y exteriores.

Entre las consideraciones recomendadas para este tipo de concreto, la revista Cemex (2023) de concreto arquitectónico menciona los siguientes:

- Los criterios de aceptación y rechazo del producto en el sitio de construcción son fijos, por lo que debe medirse en cada pasada de acuerdo con las normas ASTM C143, dentro de los 15 minutos posteriores a la llegada del camión al sitio de construcción.
- Las muestras deben procesarse y curarse de acuerdo con la norma ASTM C31. En particular, el endurecimiento debe comenzar dentro de los 30 minutos posteriores al desmontaje y permanecer completamente sumergido en agua hasta que se rompa.
- Se debe evaluar la resistencia a la compresión de las muestras de concreto de acuerdo con la norma ASTM C39.
- Se deben seguir las normas, prácticas y recomendaciones existentes con respecto a los procedimientos de colocación, vibración, manipulación, curado, protección y control del concreto.
- El curado no se recomienda realizarlo con agua, sino con un agente endurecedor para evitar manchas y plastificación.
- El concreto que ya ha comenzado a fraguar no debe vibrarse, mezclarse ni usarse si el trabajo se demora.
- Si la descarga no se realiza directamente en el elemento final, el contenedor de almacenamiento previo debe limpiarse a fondo.
- Se recomienda utilizar encofrados herméticos para evitar la pérdida de lechada de cemento.
- El molde que se utilizará para verter este tipo de hormigón debe limpiarse de cualquier residuo que pueda comprometer el acabado final.

- Asegúrese de que el desmoldeante no sea un emulsionante ya que podría cambiar el color final de los componentes y su posicionamiento.
- Una vez eliminado el molde, se debe proteger la pieza de influencias externas (lluvia, polvo, arena, productos químicos o cualquier tipo de derrame) para evitar la decoloración.
- Para conservar el color, se debe aplicar un sellador acrílico.
- La colocación de la mezcla debe ser continua.
- Se debe tener especial cuidado durante el proceso de construcción de la obra para evitar en lo posible daños físicos en su acabado.
- No añadir agua, cemento o aditivos al hormigón in situ ya que esto alteraría su estructura.

4.1.3. Componentes del concreto.

Cemento portland: El cemento es un material que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. Las materias primas utilizadas en la producción del cemento aportan la cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, los cuales interactúan en el horno rotatorio de fabricación para formar el Clinker Portland que tiene como compuestos principales, silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio, tal como se observa en la tabla 1 (Sánchez de Guzmán, 1996, Capítulo 2).

Tabla 1: *Compuestos químicos. Fuente: Sánchez de Guzmán, 1996, Capitulo 2*

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura	Contenido, porciento
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S	5 – 50
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	20 – 70
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	1 – 15
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Fe_2O_3.Al_2O_3$	C_4AF	1 - 17

Agua: La razón de que los cementos sean hidráulicos es que estos tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de las reacciones químicas de hidratación, permitiendo que se generen los compuestos químicos requeridos para alcanzar sus propiedades aglutinantes. Al mezclarse el agua con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos diluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua queda fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto queda como agua evaporable (Sánchez De Guzmán, 1996, Capítulo 1).

Agregados o Áridos: Los agregados o áridos en el desarrollo de un concreto son los materiales con mayor porcentaje en la mezcla de concreto, entre el 59 y 76%. Estos actúan como un material de relleno, haciendo más económica la mezcla. Los agregados en

combinación con la pasta fraguada también aportan parte de la resistencia mecánica característica a la compresión, dando así estabilidad volumétrica, y durabilidad. Sus características se pueden determinar mediante la granulometría, que es la distribución de los tamaños de los agregados (presentados en la tabla 2). (Sánchez De Guzmán, 1996).

Tabla 2: *Tamaño de los agregados. Fuente: (Sánchez De Guzmán, 1996)*

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz en pulg)	**Denominación corriente**	**Clasificación**	**Clasificación como agregado para concreto**
Inferior a 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
Entre 0,002 - 0,074 (No. 200)	Limo		
Entre 0,074 - 4,76 (No. 200) – (No. 4)	Arena	Agregado fino	Material apto para producir concreto
Entre 4,76 – 19,1 (No. 4) – (No. ¾")	Gravilla	Agregado grueso	
Entre 19,1 – 50,8 (No. ¾") – (No.2")	Grava		
Entre 50,8 – 152,4 (No. 92") – (No.6")	Piedra		
Superior a 152,4 (No.6")	Rajón, piedra bola		

4.1.4. Residuos de la construcción y de la demolición (RCD)

Un impacto ambiental que la industria de la construcción causa es la generación de los Residuos de la construcción y de demolición (RCD). Estos materiales proceden de gran parte de las construcciones de edificios o infraestructuras ya demolidas y por reformas o modificaciones de estas; los RCD pueden ser pétreos como los de mampostería, cerámica y concreto, también no-pétreos como plásticos, y vidrio, entre otros (Figura 2). Algunos de estos residuos serán implementados en el diseño del concreto arquitectónico del presente trabajo.



Figura 2: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Fuente: (Universidad del Norte, 2017)

En este proyecto se utilizaron distintos tipos de RCD: RL, que son partículas finas de ladrillo derivadas de escombros; Rce, fragmentos finos provenientes de cerámica; RV, residuos de vidrio en diferentes tamaños, tanto gruesos como finos. Para los agregados, se utilizó además grava reciclada obtenida de residuos de construcción.

4.1.5. Pigmentos

El concreto arquitectónico de color se realiza aplicando pigmentos. Estos son generalmente polvos con una granulometría aún más fina que la del cemento. Son químicamente inertes, insolubles en agua, resisten la alcalinidad del cemento y crean un color permanente en el concreto. Un buen color depende de la pureza del pigmento, del porcentaje de sustancia colorante, de su finura y su granulometría. Entre más pigmentos se añadan a la mezcla, más intenso será su color. Los pigmentos se pueden mezclar para obtener diferentes tonalidades, sin embargo, se recomienda no pasar del 10% de pigmentos en la mezcla para no tener exceso de partículas finas. Al combinar los pigmentos con el cemento, estos deben quedar firmemente embebidos, con los finos del cemento cuando este endurezca. Al realizar esto, la mezcla es coloreada de manera integral y no solo en superficie. Existen dos tipos de pigmentos, orgánicos (naturales) o inorgánicos (sintéticos). (Revista Novarq, 2021) (ver Figura 3). Sin embargo, pueden utilizarse materiales coloreados estables procedentes de subproductos industriales y residuos de construcción y demolición, tal como se propone en la presente investigación.



Figura 3: Pigmentos en el concreto, Fuente: (Revista Novarq,2021)

4.2. Antecedentes

Durante los últimos años se ha dado un gran avance en la investigación sobre todos con respecto a los materiales que se pueden utilizar en la industria de la construcción tanto para mejorar la calidad estética en el acabado final de una construcción como para obtener beneficios, a nivel ecológico, constructivo y de menor costo. A continuación, se presentan algunos estudios donde se ha investigado el concreto arquitectónico utilizando materiales no convencionales como lo son los residuos de vidrio molido o triturado, residuos de material cerámico, residuos de plástico, los cuales contribuyen a generar materiales amigables con el medio ambiente.

- Bernardo Tamayo-García, B. Albareda-Valls, A. Rivera-Rogel, A y Cornado, C. (14 junio 2019). Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate

Este articulo plantea la caracterización mecánica de una mezcla de concreto arquitectónico utilizando cemento blanco Lafarge y áridos reciclados de vidrio; cabe resaltar que este concreto esta propuesto para uso especialmente arquitectónico como paneles de fachada, en lugar de un uso estrictamente estructural. La evaluación mecánica de este material se realiza a través de un conjunto de ensayos experimentales como lo son resistencia a compresión y flexión, comparando tres proporciones diferentes de agregado de vidrio en la mezcla. Para la realización del estudio se utilizaron tres probetas cilíndricas (30 cm x 15 cm) y tres probetas rectangulares (60 cm x 15 cm x 5 cm) para determinar la respuesta a compresión y flexión, tomando como comparación un hormigón estructural cuya probeta cilíndrica presenta una resistencia a la compresión a los 28 días equivalente a 25 MPa, (C-25). Para describir la influencia de la cantidad de vidrio en la sustitución de los áridos tradicionales de granito, se consideraron dos escenarios diferentes en cuanto a la proporción de áridos: el primero (1 en la Tabla 3) empleando las especificaciones recomendadas para la mezcla proporcionadas por Lafarge (ver Tabla 4), el segundo (2 en la Tabla 3) con dos veces la cantidad recomendada de agregado grueso, en vidrio reciclado; y el tercero (3 en la Tabla 3) con tres veces la cantidad de agregado en la mezcla.

Tabla 3: *Muestras Analizadas, Fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page 1, table 1*

Concreto (sin Fibras)			
Proporción de agregado grueso	Cilindros (30 cm x 15 cm)		
1	P-1ª	P-2A	P-3ª
2	P-1B	P-2B	P-3B
3	P-1C	P-2C	
Concreto reforzado (con Fibras)			
	Muestras Rectangulares (60 cm x 15 cm x 5cm)		
1	M-4ª	M-5A	M-6ª
2	M-4B	M-5B	M-6B
3	M-4C	M-5C	

La relación agua/cemento se mantuvo constante en 0.48 para todos los especímenes.

En la Tabla 5 se resumen los resultados de los ensayos de compresión. Los resultados de las probetas terminadas en A corresponden a una proporción de vidrio equivalente a la recomendada por Lafarge, mientras que los terminados en B corresponden a la doble proporción de vidrio. Los tres primeros resultados correspondientes a las probetas P-1A, P-2A y P-3A muestran un buen comportamiento a compresión, en comparación con la resistencia nominal del hormigón C25. Los especímenes de concreto con el doble de vidrio como agregado generan una disminución significativa de la resistencia, y los especímenes de concreto con una cantidad triple muestran casi una tercera parte de la resistencia total, con

respecto al hormigón regular nominal C25; esta es la razón por la que los autores consideran que la segunda y tercera mezclas son adecuadas únicamente para aplicaciones arquitectónicas como paneles de acabado como los propuestos en este estudio.

Tabla 4: *Proporciones de mezcla para concreto C25, Fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page. 5, table 6*

Proporciones de mezcla de concreto según Lafarge para concreto C25					
Empresa Lafarge	Cemento (kg)	Agregado Fino (L)	Agregado Grueso (L)	Agua (L)	Fibras (box)
	6.25	8.75	13.75	3	-
Concreto sin fibras con porcentaje recomendado de agregado grueso	6.25	8.75	13.75	3	-
Concrete con fibras con doble porcentaje de agregado grueso	6.25	8.75	27.5	3	¼

Tabla 5: *Cargas ultimas alcanzadas en los ensayos a compresión, fuente: Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate, 2019, page. 7, table 7*

Especímenes	**Carga Ultima (MPa)**
P-1A	19.89
P-2A	25.73
P-3A	25.26
Doble cantidad de vidrio reciclado	
P-1B	18.66
P-2B	19.89
P-3B	19.79
Triple cantidad de vidrio reciclado	
P-1C	9.99
P-2C	9.6

- Figueroa Rincón, D. (2020). Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Universidad Santo Tomas. Facultad de Ingeniería Civil. Tunja, Boyacá.

En este trabajo de investigación se estudia la viabilidad de la implementación de diversos materiales que generen menos impactos al medio ambiente (residuos de construcción, plásticos PET, vidrio molido, bagazo de caña de azúcar), los cuales pueden ser reutilizados como sustitutos parciales de las materias primas que componen una mezcla de concreto convencional cumpliendo todos los parámetros de resistencia a la compresión y las diferentes

propiedades del concreto. Estos materiales no convencionales se utilizaron como remplazo en determinados porcentajes de los agregados finos y gruesos de una mezcla de concreto, (ver Tabla 6). En la Figura 4, se muestran los resultados obtenidos de la Resistencia a la Compresión de los cilindros de concreto a los 28 días de curado, se aprecia una mejora del concreto en sus propiedades mecánicas tales como la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, y adicionalmente una mejor trabajabilidad y durabilidad.

Tabla 6: *Comparación de resistencias a la compresión, Fuente: tesis. Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Pag 34*

Materiales no convencionales	% del agregado no convencional	Resistencia (Kg/m^2)	Resistencia muestras de concreto convencional (Kg/m^2)
Escombros de construcción	10	223.56	200.68
Escombros con limalla	16	297.80	248.74
Vidrio molido	10	325.17	311.45
plástico PET	5	459.26	353.55
Bagazo de caña de azúcar	5	305.9	353.55
Papel	5	235.74	353.55

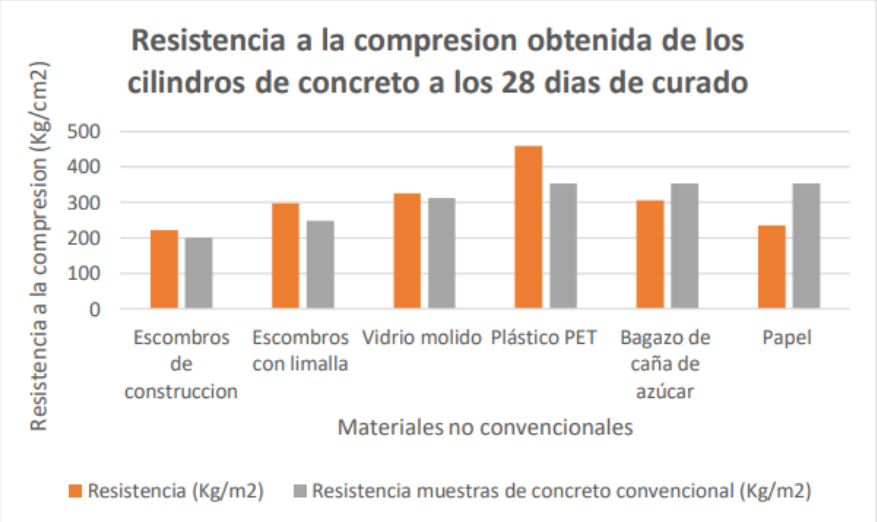


Figura 4: Comparación de los diferentes materiales no convencionales, Fuente: tesis. Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Pag 34

Se puede concluir que la elaboración del concreto con diferentes materiales no convencionales como son los escombros de construcción, la limalla, los plásticos PET y el vidrio molido, generan una viabilidad y en algunos casos aumento de las propiedades mecánicas requeridas para una mezcla de concreto.

- Mansour, G. Shamsabadi, E.A. Khodabakhshian, A. Sourmeh, F. Brito, J. (2019). Self-compacting architectural concrete production using red mud. Construction and Building Materials

En este artículo se propone el lodo rojo (RM) como un residuo rico en pigmentos coloreados, adecuado para la producción de concreto coloreado arquitectónico, debido a su alto volumen de oxido férrico (Fe_2O_3), oxido de aluminio (Al_2O_3) y dióxido de silicio (SiO_2). El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos del lodo rojo en la producción de concreto arquitectónico autocompactante (SCAC) como reemplazo del cemento y el relleno. Dado lo anterior, se produjeron en el laboratorio siete mezclas de hormigón que incorporaban diversas proporciones de lodo rojo como cemento parcial (2,5%, 5,0% y 7,5%) y relleno (25%, 50% y 75%) de sustitución. La distribución del tamaño de grano del cemento, RM, relleno y agregados utilizados en la producción de las muestras se muestra en la figura 5. El tamaño de grano promedio del cemento, RM y relleno fue de 6,34 µm, 2,86 um y 4,57 µm. respectivamente.

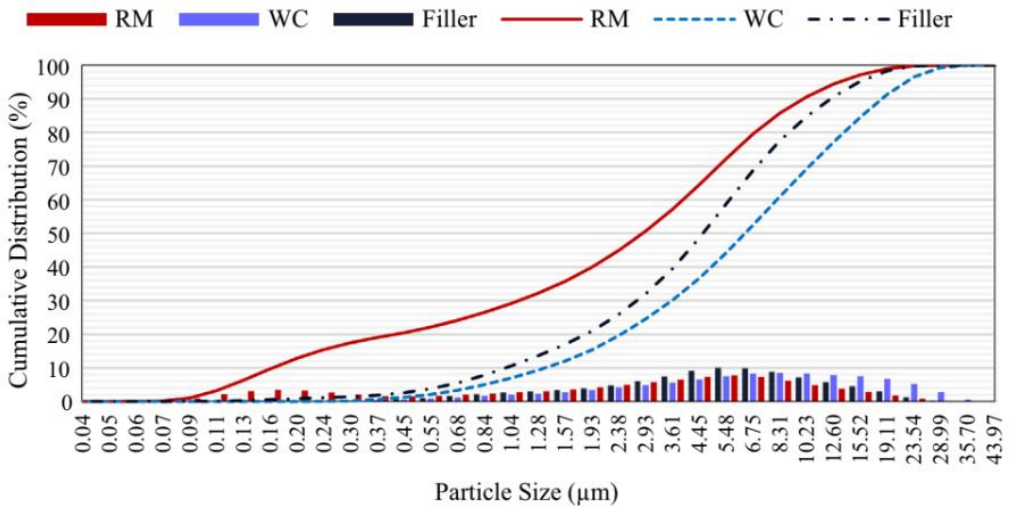


Figura 5: Distribución tamaño de grano, Fuente: Mansour, G. Shamsabadi, E.A. Khodabakhshian, A. Sourmeh, F. Brito, J. (2019). Fig1

Los resultados revelaron que la RM no afecta significativamente el comportamiento del hormigón, ya que las variaciones de los resultados fueron en su mayoría inferiores al 5% con relación al hormigón de referencia. Además, la incorporación de RM en SCAC puede mejorar la durabilidad al ataque de los sulfatos en términos de pérdida de peso, un parámetro muy importante a la hora de evaluar el comportamiento del hormigón arquitectónico, en aproximadamente un 27%. Por otra parte, el uso de RM puede ayudar a conseguir un hormigón de color verde con propiedades similares a los actuales hormigones elaborados con cemento blanco.

- Agurto Marcelo, P. (2021). Influencia de los porcentajes de aditivos superplastificantes en la consistencia de concretos fluidos en lima 2021. Universidad Privada del Norte. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.

En esta investigación se estudió la influencia de aditivos superplastificantes en los concretos fluidos, los diseños de concreto evaluados se produjeron acorde a (ACI 211.1-91, 2009). Se evaluaron diferentes % de aditivo, y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto como asentamiento inicial y consistencia en el tiempo, contenido de aire atrapado, tiempo de fraguado del concreto, y resistencia a la compresión. En el diseño, se estableció un patrón de asentamiento de 8 ½" pulgadas con un contenido total de agua de 216 litros por metro cúbico. En todas las mezclas evaluadas, se mantuvo constante la dosis del aditivo retardante al 0.25% para mantener la consistencia a lo largo de los 120 minutos, según lo medido en el ensayo ASTM C143, 2000.

La inclusión de aditivos superplastificantes tuvo un impacto significativo en la consistencia del concreto fluido al aumentar el porcentaje de aditivo del 1.0% al 2.5% respecto al peso del cemento. Esto conlleva mejoras en la consistencia del concreto y una menor pérdida de asentamiento con el tiempo. Además, contribuye a mejorar la resistencia a la compresión del concreto al reducir la relación a/c.

- Caicedo Moreno, E., Del Alamo Abanto, J. (2015). Desarrollo de concretos aplicados a la construcción de edificaciones de concreto en Lima. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.

En esta tesis se busca desarrollar una gama de concretos fluidos para el sector edificaciones, los cuales faciliten los procesos de construcción y acabados de las estructuras de concreto con diferentes tonalidades de color. Se definió una cantidad de 14,7 lts/m^3 de aditivo colorante, lo que equivale a 35 cc (centímetro cúbico por kilogramo de material cementante empleado en la mezcla); la cantidad de este aditivo puede variar de acuerdo con la tonalidad de color que se desea obtener, sin exceder las dosis establecidas. Se realizaron 10 diseños de mezcla, y se evaluó la resistencia a compresión con testigos circulares de 4" x 8" a edades de 3, 7 y 28 días. Los resultados se pueden evidenciar en la figura 6.

Los resultados a compresión de cada una de las 10 mezclas analizadas van de 291 kg/cm^2 a 486 kg/cm^2 con un promedio de 407 kg/cm^2 y desviación estándar de 83 kg/cm^2. Las mezclas con relación af/ag (Agregado fino/Agregado grueso) de 0,47 y relación a/mc (Agua/Material cementante) de 0,60 presentan un resultado promedio de 292 kg/cm^2 mientras que las mezclas con relación af/ag de 0,55 y relación a/mc de 0,60 presentan una resistencia a la compresión promedio de 334 kg/cm^2. Por otro lado, las mezclas con relación a/mc de 0.40 a 0,50 presentan resistencia a compresión promedio de 470 kg/cm^2.

En el acabado superficial se puede evidenciar que la probeta correspondiente a la mezcla M-5 presenta un acabado ideal, ya que no se observan irregularidades o vacíos superficiales, tal y como se puede evidenciar en la figura 7.

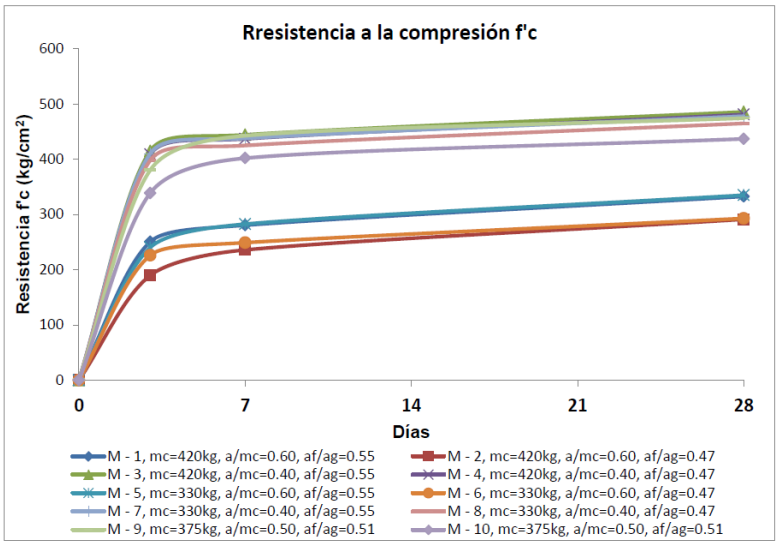


Figura 6: Resistencia a la compresión, Fuente: Caicedo Moreno, E. Del Alamo Abanto, J. (2015). Gráfico 31



Figura 7: Acabado Superficial, Fuente: Caicedo Moreno, E., Del Alamo Abanto, J. (2015). Imagen 6.

- López, A., & Di Sarli, A. R. (2016). El modelo CIELAB, las fórmulas de diferencia de color y el uso de la norma europea EN 12878 en morteros y hormigones coloreados. Revista LEMIT, (6), 41-53.

El articulo aborda la aplicación del modelo de color CIELAB y las fórmulas CIEDE1976 y CIEDE2000 para evaluar la apariencia de morteros y hormigones coloreados, utilizando la norma europea EN 12878. El objetivo principal del trabajo es analizar y cuantificar las diferencias de color en mezclas cementicias coloreadas, evaluando cómo los pigmentos, el tipo de cemento y las técnicas de curado afectan la apariencia final. El estudio se realiza en dos etapas:

- La evaluación de morteros utilizando diferentes pigmentos y tipos de cemento (gris y blanco), con el modelo CIELAB para medir parámetros como luminosidad (L), croma (C), y tono (h).
- Una comparación entre los colores de morteros y hormigones fabricados con las mismas proporciones, evaluando su similitud utilizando las fórmulas de diferencia de color.

Los resultados muestran que los morteros con cemento blanco mostraron mayor luminosidad (L) que los de cemento gris, pero con menor saturación de color. Mientras que los pigmentos de óxidos de hierro (rojo y amarillo) aumentaron significativamente la saturación y la vivacidad del color, a diferencia de los pigmentos de ftalocianinas (verde y azul) que generaron tonalidades más apagadas. Para los pigmentos negros, ya sean óxido de hierro o negro de humo, tienden a desaturar la mezcla, resultando en colores menos vivos.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología llevada a cabo en el presente proyecto consta de 5 fases, tal como se puede apreciar en la figura 8.

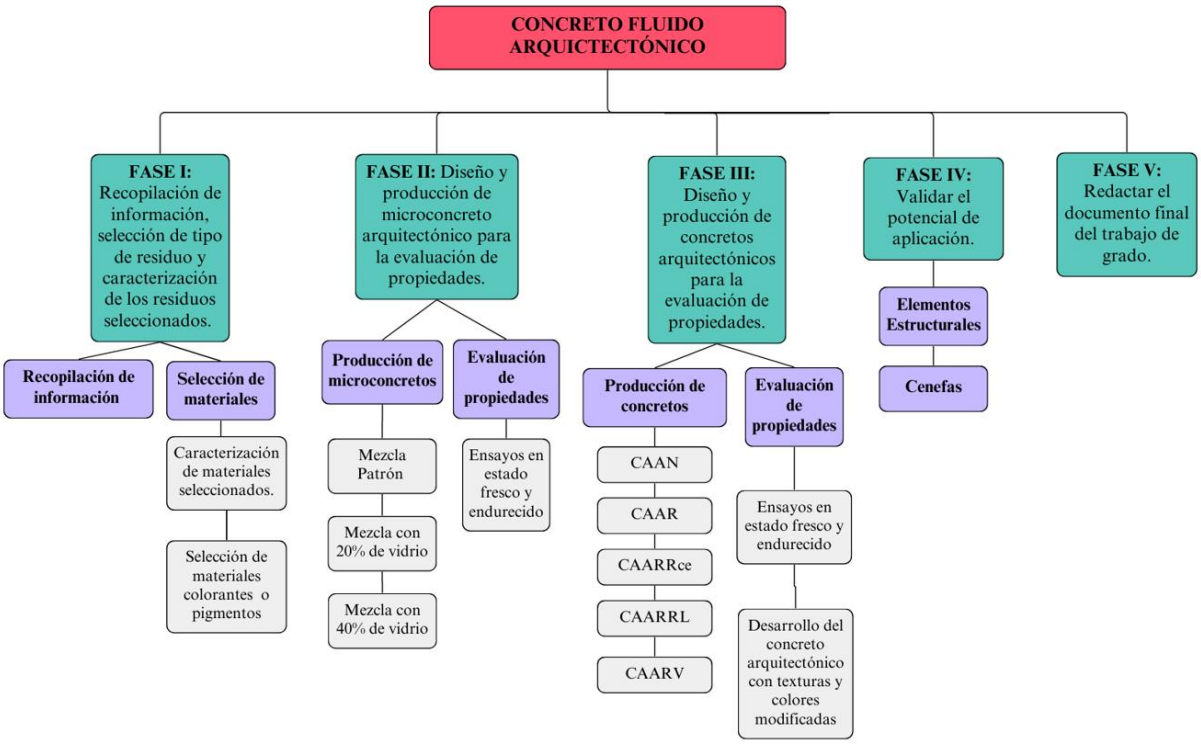


Figura 8: Metodología experimental, fuente: Elaboración propia

5.1. FASE I: Recopilación de información, selección de tipo de residuos y caracterización de los residuos seleccionados

5.1.1. Recopilación de información

Esta consistió en la búsqueda continua en bases de datos disponibles, incluyendo artículos en revistas nacionales e internacionales, reportes o trabajos de grado relacionados con el tema (Concreto Arquitectónico). Entre las bases de datos consultadas están: Scopus, ScienceDirect, Springer, entre otras.

5.1.2. Selección de materiales

El sistema cementante para lograr los especímenes de prueba y lograr un concreto arquitectónico fluido que permita obtener unas propiedades fisicomecánicas óptimas estuvo compuesto por cemento Portland ordinario (OPC) de uso general (UG). Para lograr la fluidez adecuada del concreto se utilizó un aditivo superplastificante de la marca comercial Sika

2020. Además, se utilizaron agregados convencionales y no-convencionales, estos últimos a partir de residuos de construcción y demolición.

Para obtener el color deseado en el concreto se utilizó Residuos de ladrillo (RL) y Residuos de cerámica (Rce), proveniente de residuos de construcción y demolición de la ciudad de Cali (ver Figura 9). Estos residuos fueron molturados en un molino de bolas durante un tiempo estimado de 90 minutos, el cual fue suficiente para obtener un tamaño de partícula apto para la mezcla (tamaños menores a 50μm). (Vallejo Paredes, C. Villota Coral, J.,2023)

La proporción y la adecuada colocación de los pigmentos en la mezcla cumple las normas (ASTM 979) (NTC 3760), las cuales mencionan las especificaciones necesarias para producir concreto con color sin alterar las propiedades deseables de la mezcla de concreto.



Figura 9: Polvo RL y Polvo Rce Fuente: Vallejo Paredes, C. Villota Coral, J. 2023, Fig.5

5.1.3. Caracterización de los materiales

Para determinar las propiedades físicas y químicas de los materiales finos (impalpables) y de los agregados utilizados en la elaboración de los concretos arquitectónicos, se emplearon las siguientes técnicas.

- *Materiales finos (impalpables).*
- Granulometría laser
- Densidad por picnometría de helio:

- *Agregados naturales y reciclados*
- Granulometría: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (ASTM C136) (NTC 77).
- Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (ASTM C29) (NTC 92).
- Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino (ASTM C128) (NTC 237).
- Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados (ASTM C566) (NTC 1776).
- Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino (ASTM C40) (NTC 127).

- Desgaste de los agregados (ASTM C535). (NTC 93)

- *Aditivo plastificante*

Se utilizó Sika® ViscoCrete® 2020, un superplastificante de alto rendimiento basado en policarboxilatos de última generación, según las especificaciones técnicas de Sika. Este aditivo permite obtener concretos de alta fluidez y cohesión, esenciales para el diseño de concreto arquitectónico.

- *Vidrio*

Los áridos finos en la mezcla se reemplazaron hasta un 40 % por vidrio molido procedente de botellas verdes recicladas, las cuales fueron quebradas para posteriormente triturar los residuos de vidrio en una máquina de mandíbulas, hasta obtener el tamaño de partícula adecuado.

5.1.4. Selección de materiales colorantes o pigmentos.

Para evaluar el efecto del reemplazo parcial del sistema cementante con residuos de cerámica (Rce) y ladrillo (RL), se prepararon pastas para la fabricación de cubos de 20 x 20 mm con sustituciones del 10 %, 20 % y 30 %. Se determino la relación óptima de a/C mediante el ensayo de la mesa de flujo, siguiendo la norma NTC 111, con el fin de garantizar una buena trabajabilidad y textura adecuada. A partir de estas mezclas, se analizaron la coloración y la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días para identificar la mejor proporción y combinación de materiales.

La adición de los colorantes en el concreto presento variaciones de color estéticamente aceptables y sin afectar la resistencia, por lo tanto, era indispensable prevenir que el porcentaje de color llegue al punto de saturación en donde el aumento de tonalidad por unidad de colorante es nulo. Para medir el color del concreto en estado endurecido se realizó un ensayo de colorimetría donde se utilizó un Espectrofotómetro modelo Ci6X marca X-RITE (Ver figura 10), en donde cada color fue descrito por tres valores o nociones, su tono, croma y luminosidad.



Figura 10: Espectrofotómetro modelo Ci6X, marca X-RITE.

El ensayo se fundamentó en el modelo CIELAB, representado en la Figura 11. Este modelo se describe mediante tres variables que pueden expresarse en sistemas de coordenadas cartesianas o polares. En el sistema cartesiano se emplean los valores de luminosidad (L*) junto con las coordenadas a* y b*, mientras que en el sistema polar se utilizan los parámetros L*, saturación (C*), y tono (h*) (véase Ecuaciones. 1 y 2).

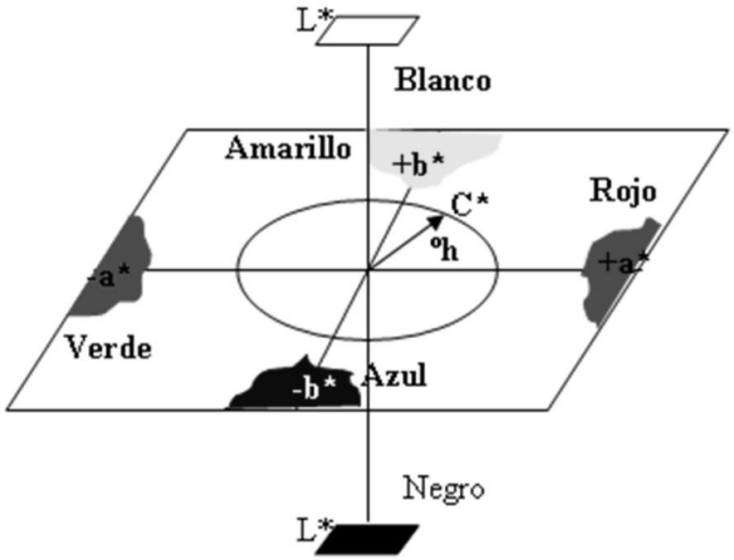


Figura 11: Espacio de color CIELAB, Fuente López, A., & Di Sarli, A. R. (2016), figura 1.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$h^* = \tan^{-1}\frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

En un sistema ortogonal, el modelo se representa mediante un eje vertical (L*), que denota claridad u oscuridad, y un plano horizontal conformado por los ejes a* y b*. El eje a* indica la variación entre rojo y verde, siendo positivo para el rojo (+a*) y negativo para el verde (-a*). Por su parte, el eje b* refleja la variación entre amarillo y azul, con valores positivos para el amarillo (+b*) y negativos para el azul (-b*). Además, la saturación está relacionada con la intensidad o viveza del color, mientras que el tono (h*) se define como el ángulo que determina si el color es rojo (0º), amarillo (90º), verde (180º) o azul (270º). (López, A. R. Di Sarli. 2016).

Para comparar diferencias de color entre las distintas muestras, evaluar la similitud o realizar reproducciones del color se calculó el parámetro diferencia de color total (ΔE). Este último permite juzgar niveles de diferencia de color percibida por el ojo humano, para ello se hizo uso de la ecuación 3.

$$\Delta E^*76 = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3)$$

De donde la escala para definir ΔE se divide en: no visible (ΔE*76< 0,2), muy leve (ΔE*76: 0,2-0,5), leve (ΔE*76: 0,5-1,5), notable (ΔE*76: 1,5-3,0), muy notable (ΔE*76: 3,0-6,0), grande (ΔE*76: 6,0-12,0), muy grande (ΔE*76 > 12,0). (López, A. R. Di Sarli. 2016)

5.2. FASE II: Diseño y producción de microconcreto arquitectónico para la evaluación de propiedades.

5.2.1. Producción de microconcretos

Inicialmente se diseñaron diferentes mezclas de microconcreto con el objetivo de evaluar el efecto del reemplazo parcial del agregado fino natural por vidrio molido. Se buscó determinar la proporción óptima que garantizara una trabajabilidad adecuada, un acabado homogéneo y el cumplimiento de los parámetros de diseño. Este análisis sirvió como referencia para el desarrollo de un concreto arquitectónico que priorizará el uso de materiales reciclados, promoviendo la sostenibilidad sin comprometer la calidad estética.

Las mezclas propuestas fueron las siguientes, donde la mezcla patrón representa el microconcreto de referencia:

- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado fino natural (Patrón)
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado fino natural - 20% de vidrio fino.
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado fino natural - 40% de vidrio fino.

Los microconcretos se moldearon en cubos de 5 × 5 × 5 cm según la NTC 220, aplicando un aditivo desmoldante Sika® Separol® para mejorar el acabado (ver Figura 12). El curado se realizó en dos etapas: 24 horas en cámara de humedad a condición controlada y luego inmersión en agua hasta los 7, 28 y 90 días.



Figura 12: Mezclas de Microconcretos en la cámara de curado.

5.2.2. Ensayos en estado fresco y endurecido

- En estado fresco se evaluó la fluidez por el método de la mesa de flujo (NTC 111).

- En estado endurecido se llevó a cabo los siguientes ensayos:
  - Resistencia a la compresión (ASTM C 39) (NTC 673), (3 especímenes por edad a 7 28 y 90 días de ensayo)
  - Densidad, absorción y porosidad (ASTM C 642) (2 especímenes para ensayar a 28 días)
  - Prueba de succión capilar (ASTM C 1585-04) ((2 especímenes para ensayar a 28 días)

5.3. FASE III: Diseño y producción de concretos arquitectónicos para la evaluación de propiedades

5.3.1 Producción de concretos

Las mezclas de concreto se diseñaron bajo las normas ACI 211. 1-81 y (ASTM C1017) (NTC 4023) para obtener una resistencia de aproximadamente 28 MPa. La coloración se modificó a partir de los Residuos de ladrillo (RL) y los Residuos de cerámica (Rce), utilizando hasta un 20% como reemplazo del cementante.

Las mezclas que se produjeron fueron las siguientes, donde CAAN es el concreto de referencia:

- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado natural (CAAN)
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado natural – pigmentos Rce (CAANPRce)
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado reciclados - (CAAR)
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado reciclados - pigmentos RL. (CAARPRL)
- Matriz cemento portland - aditivo plastificante - agregado reciclados (Vidrio grueso y fino) - (CAARV)

Se fabricaron 16 especímenes (cilindros) y 3 placas de prueba por mezcla de concreto, siguiendo las normas ASTM C 192 y NTC 1377. Se utilizó el aditivo desmoldante Sika® Separol® para optimizar el acabado superficial. El curado se llevó a cabo bajo humedad controlada durante las primeras 24 horas y, tras el desmolde, los especímenes fueron sumergidos en agua hasta el tiempo requerido.

5.3.2. Ensayos en estado fresco y endurecido

- En estado fresco se evaluó el asentamiento (ASTM C 1017) (NTC 4023).
- En estado endurecido se llevó a cabo los siguientes ensayos:
  - Resistencia a la compresión (ASTM C 39) (NTC 673), (3 especímenes por edad a 7 28 y 90 días de ensayo)
  - Resistencia a la tracción indirecta (ASTM C 496) (NTC 722) (3 especímenes para ensayar a 28 días)

- Densidad, absorción y porosidad (ASTM C 642) (2 especímenes para ensayar a 28 días)
- Prueba de succión capilar (ASTM C 1585-04) ((2 especímenes para ensayar a 28 días)
- Evaluación de placas arquitectónicas (Resistencia a la flexión ASTM C293) ((3 por mezcla para ensayar a 28 días)

5.3.3. Desarrollo del concreto arquitectónico con texturas y colores modificadas

La textura del concreto fue diseñada en el momento del fraguado, se aplicó un molde en silicona (Ver figura 13), para que la superficie tome la forma de este, replicándolo como un patrón repetitivo a lo largo de la superficie y realizando algunas modificaciones de carácter superficial que implementen relieve, acanalados o dibujos específicos. Para aportar color al concreto, se incorporaron RL y Rce en la mejor proporción (10 %, 20 % y 30 %) determinada en los ensayos de resistencia y colorimetría.



Figura 13: Molde en silicona para brindar la textura a las aplicaciones de Concreto Arquitectónico.

5.4. Fase IV: Validar el potencial de aplicación.

Basados en los resultados obtenidos, las condiciones óptimas de cada material de estudio y las características físico-mecánicas del concreto arquitectónico se evaluó los acabados de cada muestra y seleccionada una mezcla en particular con modificaciones respecto al diseño y textura se produjo elementos estructurales tipo muretes. Paralelamente se produjeron elementos tipo cenefas basados en las mismas mezclas, pero sin incorporación de agregados gruesos.

5.5. FASE V: Redactar el documento final del trabajo de grado.

6. RESULTADOS Y ANALISIS

6.1. FASE I: Recopilación de información, selección de tipo de residuos y caracterización de los residuos seleccionados

6.1.1. Selección de materiales

Durante el desarrollo de las mezclas para los especímenes de prueba, se determinó el uso de un cemento blanco, ideal para lograr un concreto arquitectónico de alta calidad. Este tipo de cemento fue seleccionado debido a sus propiedades, que ofrecen ventajas significativas para este tipo de aplicaciones, entre la que se destaca la estética superior, debido a que el cemento blanco permite obtener un acabado más uniforme y limpio, lo que resulta esencial en concreto arquitectónico donde la apariencia visual es un factor clave. Adicionalmente, se utilizó residuo de cerámica y ladrillos, para lograr obtener colores alternativos en los concretos arquitectónicos.

6.1.2. Caracterización de los materiales

- *Materiales finos impalpables, Rce y RL*

    - Granulometría laser

Se realizó un análisis de Difracción Láser (LD) en las muestras Rce y RL utilizando el equipo MASTERSIZER-2000, un instrumento empleado para la medición de la Distribución del Tamaño de Partícula (PSD) y su correspondiente tamaño promedio. Este equipo cuenta con un sistema de inyección Hydro 2000/MU, que facilita la dispersión de las muestras en fluidos. En la figura 14 se presenta la distribución granulométrica obtenida para las muestras analizadas. En las curvas granulométricas de la gráfica se puede evidenciar que el residuo de cerámica (Rce) presenta un pico máximo de tamaño de partícula cercano a 100 µm, lo que indica una mayor proporción de partículas finas, lo que puede favorecer su dispersión en la mezcla de concreto. En cambio, el residuo de ladrillo (RL) exhibe un pico alrededor de 150 µm, con una mayor proporción de partículas gruesas, lo que podría influir en la textura y la trabajabilidad del material.

La composición química de estos materiales (Rce y RL), determinada por fluorescencia de rayos X (XRF) utilizando un espectrómetro MagiX-Pro PW-2440 (Phillips PANalytical, Tollerton, EE. UU.), se muestra en la tabla 7. Los dos materiales presentan un alto contenido de SiO_2 (64.0% y 60.0%, respectivamente), lo que sugiere una buena reactividad en sistemas activados alcalinamente. La muestra RL posee un mayor contenido de Al_2O_3 (20.5%) en comparación con Rce (19.1%), lo que podría influir en la formación de geles aluminosilicatos (Martínez Gutiérrez, F. 2022)

El contenido de CaO es mayor en Rce (4.8%) que en RL (2.4%), mientras que RL muestra un mayor porcentaje de Fe_2O_3 (9.2% frente a 6.4%), lo que puede impactar algunas propiedades mecánicas. La pérdida por ignición (LOI) es baja en ambas muestras, con valores de 0.5% y 0.3%, respectivamente.

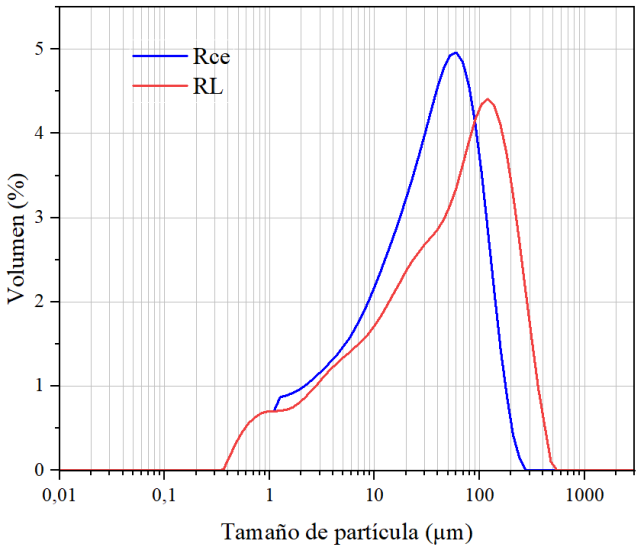


Figura 14: Curvas de distribución del tamaño de partículas del Rce y RL. Tomada y modificada de (Robayo, R. 2020).

Tabla 7: *Composición química de Rce y RL (%).*

Componente	SiO_2	Al_2O_3	Cao	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	$Otros$	LOI
Rce	64.0	19.1	4.8	6.4	1.7	0.5	1.5	1.5	0.5
RL	60.0	20.5	2.4	9.2	3.1	1.0	1.8	1.7	0.3

Tomada y modificada de (Valencia-Saavedra, W., Robayo Salazar, R., & Mejía de Gutiérrez, R. 2021)

- Densidad por picnometría de helio:

En el Laboratorio de Caracterización de Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Universidad del Valle se determinó la densidad real de los materiales de Rce y RL, con ayuda del picnómetro de helio Ultrapyc 3000 marca Anton Par. Los criterios de corrida para el ensayo fueron: máximo 10 mediciones y variación porcentual menor que 0.05%. En la tabla 8 se reporta el promedio de la densidad y volumen de cinco (5) lecturas seleccionadas por el equipo para las muestras entregadas.

Tabla 8: *Resultados de densidad por picnómetro de Helio.*

Muestra	Promedio volumen (cm^3)	Promedio Densidad Real (g/cm^3)
Polvo de Ladrillo RL	2,184	2,828
Polvo de Cerámica Rce	2,847	2,713

La densidad del RL sugiere que el polvo de ladrillo tiene una estructura relativamente compacta y densa, su alta densidad puede ser indicativa de una menor porosidad, lo que podría influir en sus propiedades mecánicas (González & Pérez, 2021). La densidad del Rce, aunque ligeramente menor que la del polvo de ladrillo, indica una estructura densa. La diferencia en densidad puede deberse a la composición y el proceso de fabricación de la cerámica, que puede incluir diferentes tipos de arcillas y aditivos (Mallol, Get al., 2010).

- *Agregados naturales y reciclados*

Grava natural y reciclada

- Granulometría (NTC 77)

El tamaño máximo nominal de la grava natural utilizada fue de 3/4 de pulgada (aproximadamente 19 mm), mientras que el tamaño máximo fue de 1 pulgada, esto realizado conforme a las especificaciones ASTM C33. Este tamaño es comúnmente utilizado en la producción de concreto para estructuras de mediana resistencia, como pavimentos y muros, y está dentro del rango recomendado para la mayoría de las aplicaciones estructurales, su curva granulométrica se puede ver en la figura 15. Los agregados gruesos reciclados utilizados en este estudio provienen de residuos de construcción y demolición (RCD). En cuanto a sus características físicas, el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal obtenido fue de 3/4 de pulgada (aproximadamente 19 mm), cumpliendo con los requisitos establecidos para su uso en concreto estructural y no estructural; su curva granulométrica se puede ver en la figura 15.

Por otro lado, las partículas más gruesas del vidrio, que quedaron retenidas en el tamiz #4, obtuvieron un tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada. Esto se hizo considerando que su granulometría fuera similar a la de las gravas utilizadas, asegurando así una distribución de tamaños de partículas adecuada para su uso en concreto y contribuyendo a un acabado arquitectónico deseado.

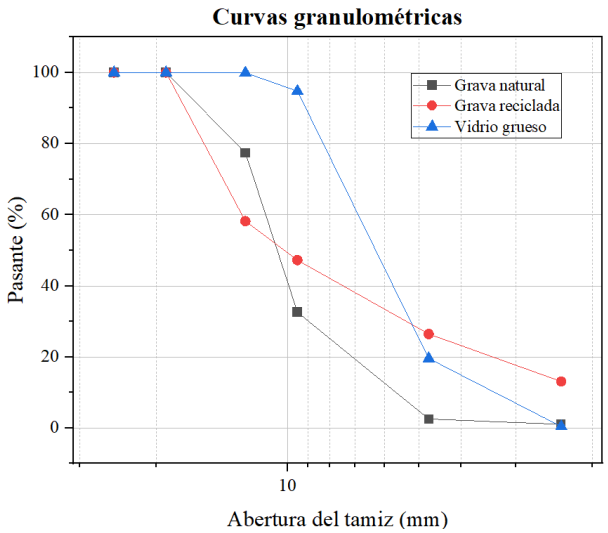


Figura 15: Curvas granulométricas de los agregados gruesos

- Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (ASTM C29) (NTC 92).

La masa unitaria de los agregados gruesos se determinó siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM C29. Este ensayo es fundamental para seleccionar las proporciones adecuadas de los materiales. En la tabla 9, se presentan los resultados obtenidos para la masa unitaria suelta y apisonada de los agregados gruesos, así como el contenido de vacíos.

Tabla 9: *Resultados de Masa Unitaria, para agregados gruesos*

Tipo de Agregado	Masa Unitaria Suelta (kg/m^3)	Contenido de Vacíos Suelta (%)	Masa Unitaria Apisonada (kg/m^3)	Contenido de Vacíos Apisonada (%)
Agregado Grueso Natural	1494,08	41,13	1646,94	35,11
Agregado Grueso Reciclado	1376,95	42,29	1495,3	37,33

Los resultados obtenidos para la masa unitaria y el contenido de vacíos del agregado natural están dentro de los rangos especificados por la norma ASTM C29, donde valores entre 1400 y 1600 kg/m^3 de masa unitaria suelta en agregados naturales y un contenido de vacíos entre 35% y 45% son adecuados para su uso en mezclas de concreto. Los agregados gruesos reciclados suelen tener una masa unitaria suelta ligeramente menor que los agregados naturales debido a su mayor porosidad y variabilidad en la composición. Los valores obtenidos están dentro de los rangos aceptables para agregados reciclados, con una masa unitaria suelta entre 1300 y 1500 kg/m^3 y un contenido de vacíos suelta entre 40% y 50% (NTC 92).

- Densidad y absorción del agregado grueso (NTC 176).

En la tabla 10, se presentan los resultados obtenidos para la grava natural y el agregado reciclado. Al comparar las propiedades de la grava natural y la grava reciclada, se observan diferencias significativas, lo que indica que la grava natural es más densa y puede proporcionar mayor resistencia estructural. La densidad relativa aparente es mayor en la grava reciclada en comparación con la grava natural, posiblemente debido a la presencia de materiales adheridos o porosos. La densidad saturada superficialmente seca (SSS) es similar en ambos tipos de grava, lo que sugiere una capacidad similar para absorber agua hasta un punto de saturación superficial. Sin embargo, la absorción es significativamente mayor en la grava reciclada (6.62%) en comparación con la grava natural (1.69%), indicando una mayor porosidad en la grava reciclada, lo que puede afectar negativamente la durabilidad y resistencia del concreto.

Tabla 10: *Resultados de Densidad y Absorción para agregados gruesos.*

Propiedad	Grava Natural	Grava Reciclada	Grava Natural SSS	Grava Reciclada SSS
Densidad Relativa (SH) (g/cm³)	2,54	2,39		
Densidad Relativa (Aparente)(g/cm³)	2,66	2,84		
Densidad SSS (g/cm³)	2,59	2,55		
Absorción (%)	1,69	6,62		

Según la norma ASTM C127 los valores de densidad y absorción obtenidos para la grava natural y reciclada están dentro de los rangos aceptables, aunque la alta absorción de la grava reciclada puede requerir consideraciones adicionales en su uso para asegurar la durabilidad del concreto.

- Desgaste de los agregados (ASTM C535). (NTC 93)

El ensayo de desgaste se realizó conforme a la norma ASTM C535 (NTC 93), que determina la resistencia al desgaste e impacto de los agregados mediante la máquina de Los Ángeles, los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11: *Resultados de Desgaste de los agregados gruesos.*

Tipo de agregado	Masa inicial (g)	Masa retenida (g)	Pérdida de masa (g)	% Desgaste	Clasificación según ASTM C535 / NTC 93
Grava natural	5000,42	4460	540,42	10,81%	Aceptable (≤ 50%)
Grava reciclada	5000,75	3540	1460,75	29,21%	Aceptable (≤ 50%)

El desgaste del 29,21% en el agregado reciclado es característico de este tipo de material debido a su superficie más irregular, al mortero adherido que presenta y a su procedencia.

Agregados finos (Arena natural y Vidrio)

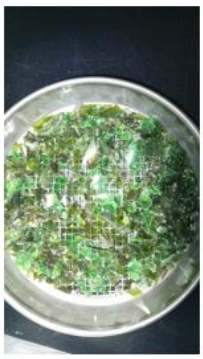
- Selección del vidrio como agregado fino

El agregado de vidrio se obtuvo a partir de botellas verdes recicladas, (ver figura 16). Estas botellas se rompieron y los fragmentos de vidrio se introdujeron en una máquina trituradora de mandíbulas, obteniendo partículas de gran tamaño. Luego, estas partículas se procesaron en un molino de discos, obteniendo los tamaños presentados en la tabla 12.



Figura 16: Botellas verdes reciclados, para utilizarlas como agregado fino.

Tabla 12: *Tamaños obtenidos del vidrio después de pasar por la máquina.*

RETIENE # 4	PASA TAMIZ # 4	RETIENE # 16	PASA # 16
			

Se determinó que los tamaños de vidrio retenidos en el tamiz #4 eran demasiado grandes para utilizarlos como arena. Sin embargo, el material tampoco debía quedar muy fino, ya que se perdería la coloración en el concreto. Por lo tanto, se combinaron los tamaños que pasan por el tamiz #4, los que se retienen en el tamiz #16 y los que pasan por el tamiz #16, utilizándolos como agregado reciclado fino. El material retenido en el tamiz #4 se usó como agregado grueso, con el fin de realizar un concreto en el que el vidrio sea visible, mejorando así su textura y acabado.

- *Granulometría (NTC 77)*

El módulo de finura de la arena natural utilizada en la mezcla de concreto se determinó mediante análisis granulométrico según la NTC 77, obteniendo un valor de 2.61. Este valor se encuentra dentro del rango establecido por las normas de diseño de concreto (ASTM C33, ACI 318), que generalmente es entre 2.3 y 3.1 para arenas de buena calidad. Un valor de 2.61 indica que la arena tiene una distribución equilibrada de tamaños de partículas, lo que mejora la trabajabilidad y cohesión de la mezcla de concreto, favoreciendo una correcta hidratación del cemento y la formación de una pasta densa y resistente.

El módulo de finura del vidrio utilizado como material fino fue de 3,85. Este alto valor se debe a que se requiere que las partículas de vidrio sean más grandes que las partículas de arena común, ya que es necesario que estas partículas sean visibles en las muestras finales para transmitir un acabado arquitectónico. Por lo tanto, era esperable que el módulo de finura sea mayor de lo habitual. La curva granulométrica correspondiente a cada agregado fino se puede ver en la figura 17

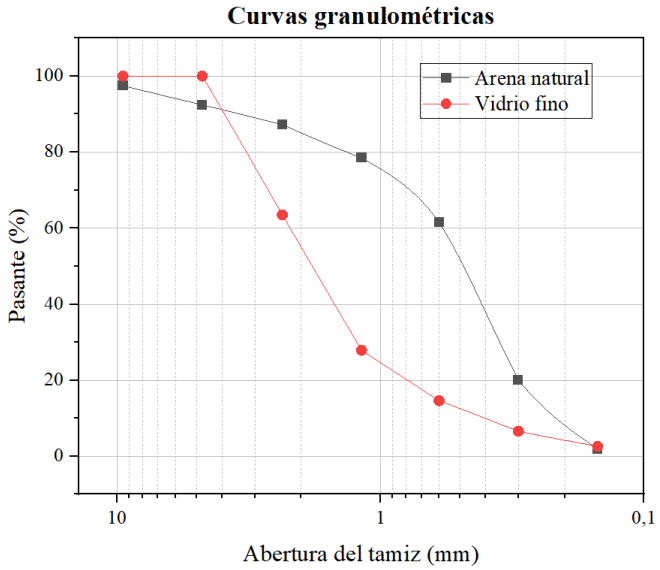


Figura 17: Curvas granulométricas de los agregados finos.

- Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (ASTM C29) (NTC 92).

La masa unitaria de los agregados finos se asume de acuerdo con los procedimientos de la norma ASTM C29. La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos para la masa unitaria suelta y compacta de los agregados finos, junto con el contenido de vacíos en los agregados.

La masa unitaria y el contenido de vacíos de la arena natural está dentro de los rangos especificados por la norma ASTM C29, donde para masa unitaria suelta esta entre 1400 y 1600 kg/m³ y un contenido de vacíos suelta entre 40% y 50%. La masa unitaria apisonada y el contenido de vacíos apisonada también son adecuados, reflejando una buena densidad y compactación del material.

Tabla 13: *Resultados de Masa Unitaria, para agregados finos.*

Tipo de Agregado	Masa Unitaria Suelta (kg/m³)	Contenido de Vacíos Suelta (%)	Masa Unitaria Apisonada (kg/m³)	Contenido de Vacíos Apisonada (%)
Agregado Fino Natural	1513,81	43,32	1637,70	38,68
Agregado fino vidrio	1299,34	48,23	1412,42	43,72

Los resultados obtenidos para el agregado fino de vidrio muestran una masa unitaria suelta de 1299,34 kg/m³ y una masa unitaria apisonada de 1412,42 kg/m³, ambos valores ligeramente inferiores a los típicos para agregados finos naturales debido a la menor densidad del vidrio. El contenido de vacíos suelta es del 48,23% y el apisonado del 43,72%, lo cual es alto pero esperado para el vidrio, reflejando su forma y textura superficial. Estos valores son adecuados para aplicaciones donde se busca un acabado arquitectónico distintivo, ya que la alta cantidad de vacíos y la menor densidad contribuyen a las propiedades estéticas y funcionales del material.

- Densidad y la absorción del agregado fino (ASTM C128) (NTC 237).

La densidad y la absorción del agregado fino se determinaron siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM C128 y NTC 237. En la tabla 14, se presentan los resultados obtenidos para la arena y el agregado fino de vidrio.

Tabla 14: *Resultados de Densidad y Absorción para agregados finos.*

Propiedad	Arena Natural	Agregado Fino de Vidrio	Arena SSS	Vidrio SSS
Densidad Relativa (SH) (g/cm³)	2,68	2,51		
Densidad Relativa (Aparente)(g/cm³)	2,75	2,51		
Densidad SSS (g/cm³)	2,70	2,51		
Absorción (%)	1,05	0		

Los resultados muestran que la arena natural tiene una estructura compacta debido a su granulometría y mayor densidad, lo que reduce los espacios vacíos entre partículas y

proporciona una capacidad moderada para retener agua, beneficiosa para la trabajabilidad y cohesión del concreto. En comparación, el agregado fino de vidrio presenta una densidad relativa seca al horno, aparente y SSS de 2,51 g/cm³, con una absorción del 0%. La menor densidad y la falta de absorción del vidrio se deben a su estructura no porosa. Esta característica no porosa del vidrio es adecuada para aplicaciones donde se busca un acabado arquitectónico distintivo, ya que reduce la posibilidad de absorción de humedad y mejora la durabilidad y el aspecto estético del concreto (Environmental Engineering Science, 2011).

- Impurezas orgánicas en agregado fino (ASTM C40) (NTC 127).

De acuerdo con la escala colorimétrica de Gardner conforme a la norma NTC 127 (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2000a), el contenido de impurezas de la arena natural la posiciona entre las placas orgánicas N° 1 tal y como se muestra en la figura 18a. En el caso del vidrio reciclado, el análisis colorimétrico muestra una transparencia característica (ver figura 18b), confirmando la ausencia de impurezas orgánicas. Esto se debe a la naturaleza química del vidrio, que no presenta materia orgánica en su composición, considerándose ambos agregados finos aceptables para su utilización en las mezclas.

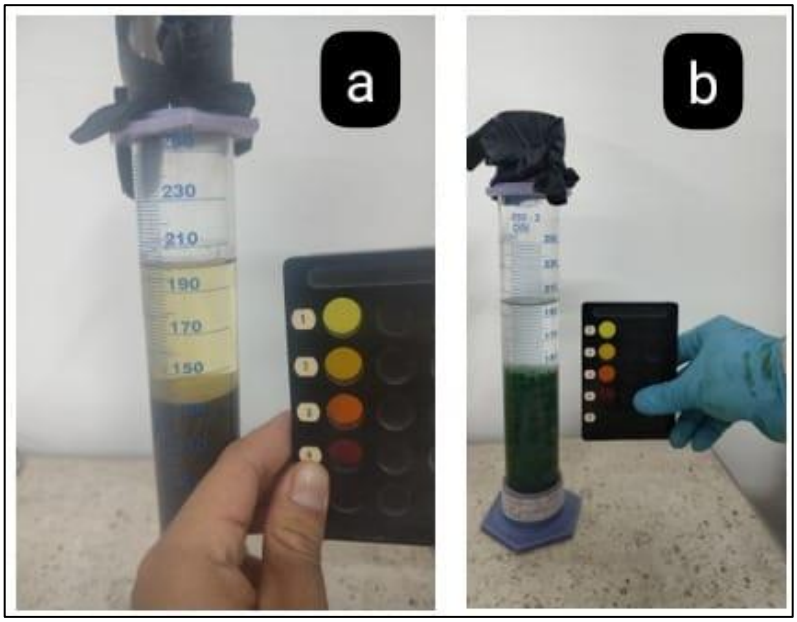


Figura 18: Resultados del ensayo de impurezas orgánicas, a) arena. b) Vidrio.

- Selección del superplastificante

Se empleó Sika® ViscoCrete® 2020, un superplastificante de alto rendimiento a base de policarboxilatos, para garantizar la fluidez y cohesión del concreto. En la Tabla 15 se presenta la ficha técnica del aditivo.

Tabla 15: *Ficha técnica del superplastificante Sika ViscoCrete WR-2020. Fuente: Sika (2019)*

NOMBRE	**Sika ViscoCrete WR-2020**	
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	Superplastificante de alto rendimiento de última generación basado en policarboxilatos de altas prestaciones para hormigones	
INFORMACIÓN DEL PRODUCTO	Base química	policarboxilato modificado en base acuosa
	Presentación	Tambor 220 kg - A granel bajo pedido
	Apariencia / color	Líquido translucido
	Vida útil	12 meses a partir de la fecha de fabricación
	Condiciones de almacenamiento	conservar en envases originales bien cerrados y en lugar fresco y seco. Protegerlos de la corrosión. Preservarlos del congelamiento.
	Densidad	1,08 kg/l a 20°C
	PH	5 +/- 1
INFORMACIÓN DE APLICACIÓN	Dosificación recomendada	1. reducción de agua entre 15% y 35% - 2. Dosis: 0,5% y 1,5% respecto del peso del material cementicio
	Compatibilidad	siempre se deben realizar ensayos previos con los materiales a utilizar
	Restricciones	Nunca adicionarlo directamente sobre el cemento seco o antes de añadir al agua

- *Selección de materiales colorantes o pigmentos.*

Para la selección del material colorante o pigmento se evaluaron diferentes aspectos que se discutirán a continuación:

- Resistencia a la compresión

Se prepararon pastas para realizar cubos de 20 x 20 mm, en los cuales se reemplazó el sistema cementante con un 10%, 20% y 30% de residuo de cerámica (Rce) y residuo de ladrillo (RL). El objetivo era determinar cómo varían la coloración y la resistencia a la compresión a los 7 y 28, para elegir la mejor proporción y relación. En total, se prepararon 7 mezclas.
Para determinar la relación óptima de a/C en las pastas, se realizó el ensayo de la mesa de flujo siguiendo las recomendaciones de la NTC 111, para de esta forma obtener una buena trabajabilidad y una textura adecuada al incorporar áridos hasta en un 30% del contenido total de los sólidos.

Se inició reemplazando el RL en un 30% del cementante y con una relación de líquidos sobre sólidos de 0,35. Los resultados y la textura de la pasta se pueden ver en la tabla 16 y la figura 19a, respectivamente. Debido a que no se obtuvo una buena trabajabilidad en la pasta y el diámetro fue muy pequeño, se realizó una segunda mezcla, esta vez aumentando la relación de líquidos sobre sólidos a 0,40. Los resultados de su diámetro y la textura de la pasta se pueden ver en la tabla 16 y la figura 19b, respectivamente.

Tabla 16: *Resultados de los diámetros obtenidos en la mesa de flujo.*

Resultados mesa de flujo		
Liquido/solidos	L/S: 0,35	L/S: 0,40
Cantidad	Diámetros (cm)	Diámetros (cm)
1	17,00	30,00
2	18,00	29,00
3	18,80	28,20
4	18,00	29,80
diámetro final	71,80	117,00

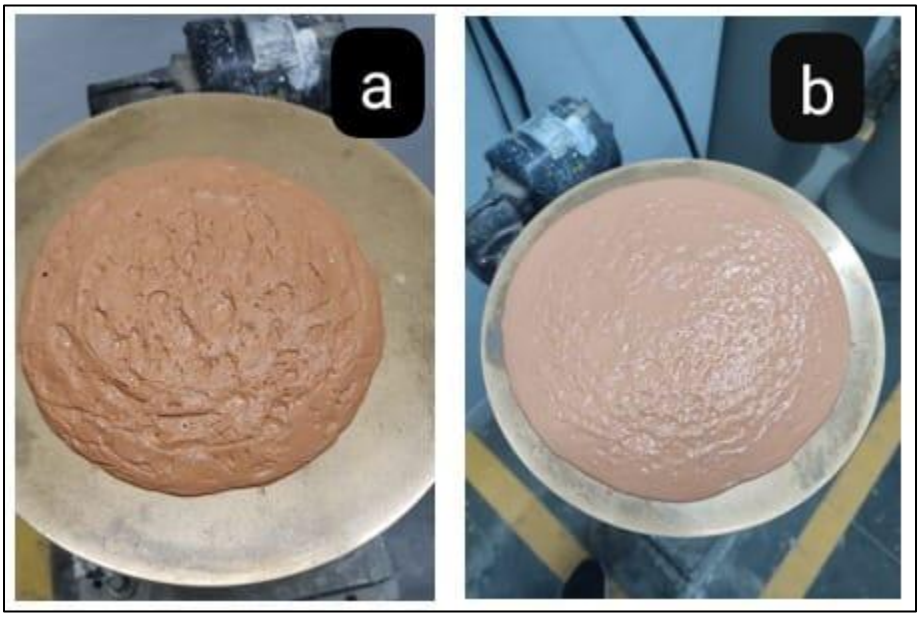


Figura 19: a) Pastas con reemplazo de Rl del 30 % y usando una relación de líquidos sobre solidos del 0,35. b) Pastas con reemplazo de Rl del 30 % y usando una relación de líquidos sobre solidos del 0,40

Para asegurar la trabajabilidad de la pasta, y tras realizar los ensayos de mesa de flujo siguiendo las recomendaciones de la NTC 111, trabajar con una relación de líquidos a sólidos de 0,40. Con esta relación se prepararon siete mezclas. Se realizó una mezcla patrón

utilizando únicamente el material cemento blanco, mientras que las otras seis mezclas se hicieron reemplazando el 10%, 20% y 30% del RL y Rce.

Cabe aclarar que la mesa de flujo solo se realizó para las mezclas con el 30% de RL y el 30% de Rce, ya que estas contenían la mayor cantidad de pigmento y, por lo tanto, se esperaba una mayor absorción de agua, afectando significativamente la trabajabilidad. Para los otros porcentajes (10% y 20% de RL y Rce), así como para la mezcla patrón, no se consideró necesario realizar el ensayo, dado que, al tener menor cantidad de pigmento, su demanda de agua sería menor y la fluidez se mantendría dentro de rangos adecuados. Además, la intención era mantener la relación de agua sobre sólidos determinada a partir de las mezclas en las que se realizó el ensayo de la mesa de flujo, asegurando así condiciones homogéneas para todas las mezclas.

Los tiempos de curado fueron de 7 y 28 días, y los resultados de las resistencias a compresión se muestran en la figura 20.

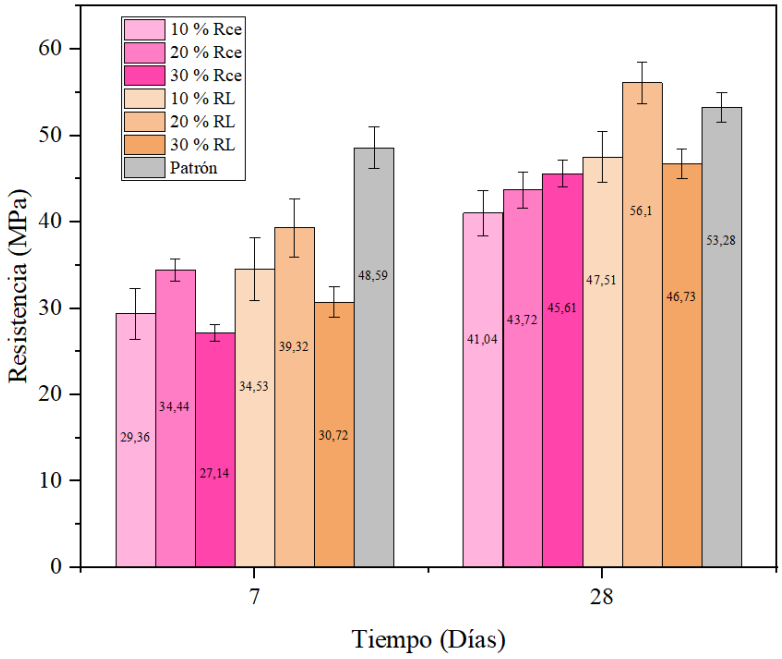


Figura 20: Resistencia a Compresión de pastas a 7 y 28 días.

A partir de las resistencias obtenidas, se calculó el Índice de Actividad Puzolánica por desempeño mecánico siguiendo la norma ASTM C311. Se evaluó el comportamiento de cada muestra en relación con los porcentajes de reemplazo de RL y Rce. Los resultados de este análisis se presentan en la figura 21. Este índice es crucial para determinar la eficacia de los materiales puzolánicos en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto.

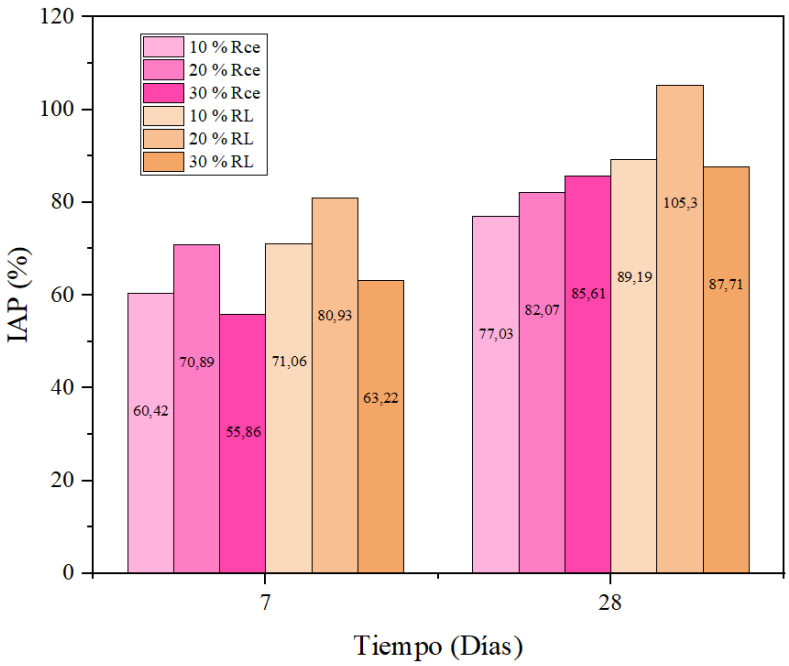


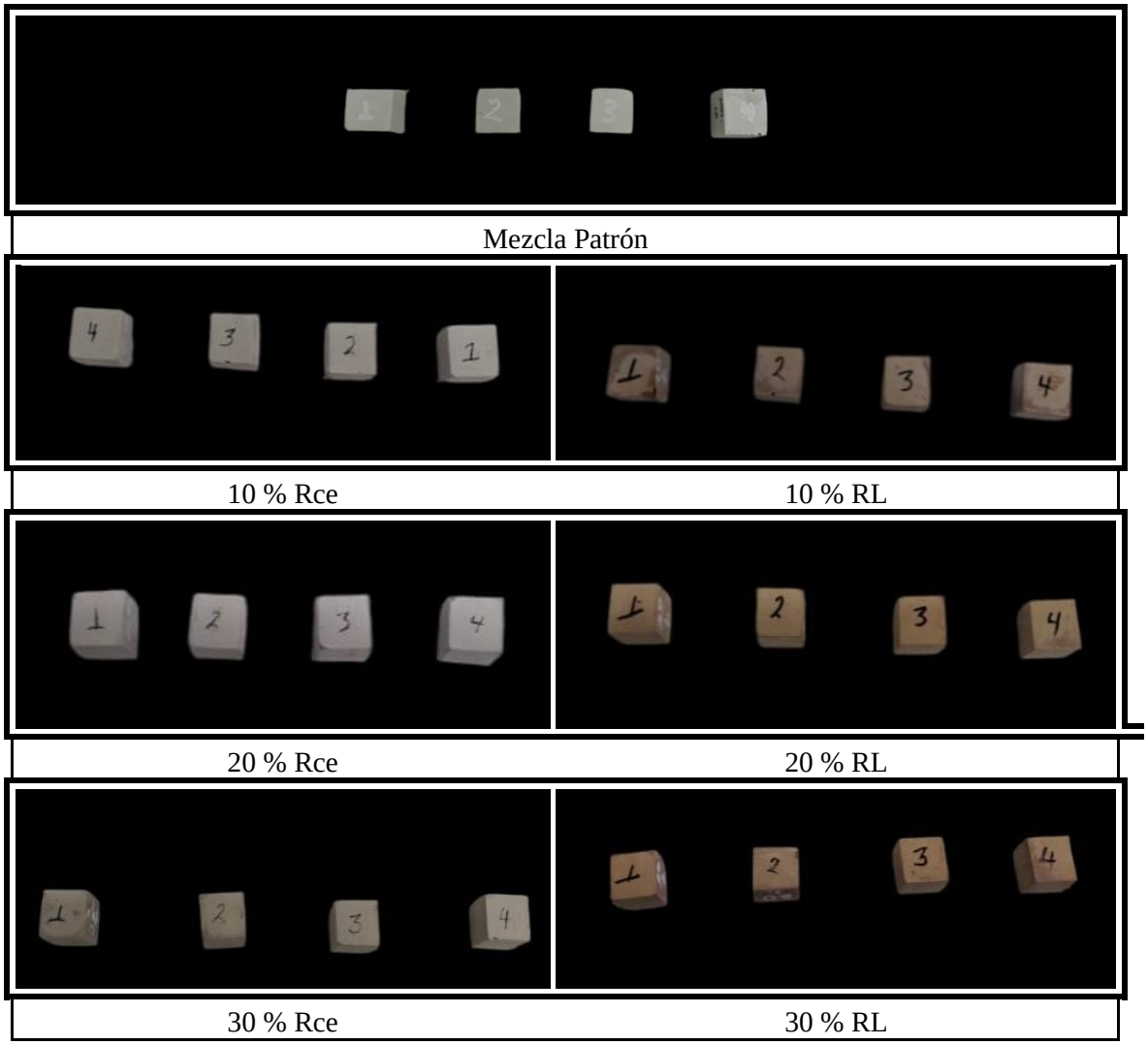
Figura 21: Índice de Actividad Puzolánica para las muestras de ensayo.

Al observar la figura 20, se puede apreciar cómo varían las resistencias en función de los diferentes porcentajes de reemplazo, proporcionando una visión clara de la influencia de RL y Rce en el desempeño del material. A largo plazo, los residuos de cerámica muestran una mejora en la resistencia, resaltado el reemplazo de un 20% de Rce, lo que sugiere una contribución positiva a la matriz de cemento a medida que avanza la hidratación (Viera, P, Chicaiza. C, 2018)**.** Esto puede deberse a la reacción puzolánica de los residuos de cerámica, donde se puede apreciar de la figura 21 que el índice de actividad puzolánica supera el 75% en todos los porcentajes de Rce a los 28 días que sugiere la norma ASTM C618 para considerar la adición como puzolana lo que indica que hay una interacción con el hidróxido de calcio libre y forma productos cementantes adicionales para mejorar la resistencia a edades tardías. Lo mismo se puede apreciar del residuo de ladrillo en la figura 20, donde se muestra una mejora significativa en la resistencia a largo plazo, especialmente al 20%, donde incluso superan al cemento puro. Esto puede deberse a la alta reactividad puzolánica del residuo de ladrillo, obteniendo un IAP de 105,3 % lo que contribuye en gran medida a la formación de productos cementantes adicionales para mejorar la microestructura de la pasta.

- Ensayo de colorimetría

El ensayo se llevó a cabo utilizando las siete mezclas de pastas que se diseñaron en la parte inicial del proyecto. En la tabla 17, se presentan las muestras correspondientes a cada una de estas mezclas, lo que permitirá iniciar el análisis detallado de sus características y resultados obtenidos.

Tabla 17: *Cubos elaborados en la producción de pastas para el ensayo de coloración a 28 días de curado.*



La Tabla 18 resume los valores de luminosidad (L*), las coordenadas cromáticas (a* y b*), la saturación (C*), y el tono (h*) para todas las mezclas evaluadas, Además se exhiben los diagramas de barras de valores promedios de a*, b*, L* acompañados por el desvío estándar (Ver figura 22). Se puede ver como el ángulo de tono (h*) refleja la tonalidad dominante de cada muestra. La muestra patrón tiene un tono en el rango verde-amarillo (h* = 102.97°), mientras que las mezclas con Rce muestran una disminución progresiva del ángulo de tono, moviéndose hacia el rojo-amarillo. Por ejemplo, con 10% de Rce el tono es de h* = 69.56°, y con 30% de Rce disminuye a h* = 62.98°. Este desplazamiento evidencia un cambio hacia colores más cálidos.

En el caso de las mezclas con RL, se observa un desplazamiento más significativo hacia tonos cálidos. Con 10% de RL, el ángulo de tono es de h* = 60.53°, y con 30% de RL se reduce aún más a h* = 56.37°.

Tabla 18: *Valores promedios de L*, a*, b*, C* y h* en las mezclas de pastas.*

Mezclas	L*	a*	b*	C*	h*
Patrón	88,42	-0,65	2,83	2,90	102,97
10% Rce	81,40	2,01	5,40	5,76	69,56
20% Rce	78,00	2,65	5,61	6,21	64,76
30% Rce	76,38	3,41	6,70	7,52	62,98
10% RL	75,67	7,98	14,12	16,22	60,53
20% RL	70,93	9,77	16,12	18,85	58,79
30% RL	69,02	11,04	16,59	19,93	56,37

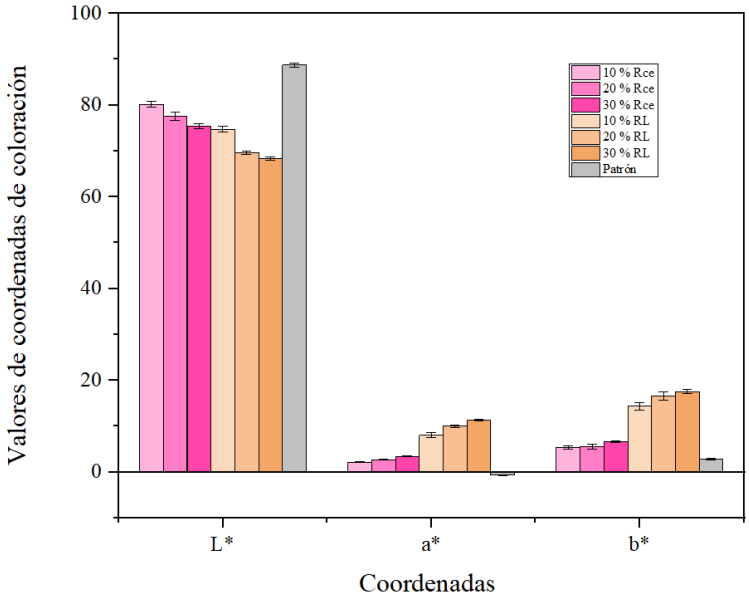


Figura 22: Valores promedios de a, b*, L* para cada pasta.*

La Figura 23 muestra la representación de las coordenadas a* (rojo-verde) y b* (amarillo-azul) de las diferentes mezclas. La muestra patrón se encuentra cerca del origen, con valores bajos de a* (-0.65) y b* (2.83), lo que indica un color tenue con una ligera inclinación hacia el amarillo. En el caso de las mezclas que contienen residuos de cerámica (Rce), se observa un aumento progresivo en los valores de a* y b* conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento. Por ejemplo, la mezcla con 10% de Rce presenta valores de a* (2.01) y b* (5.40), reflejando una mayor presencia de tonos cálidos, mientras que con 30% de Rce los valores aumentan a a* (3.41) y b* (6.70), indicando un color más cálido e intenso.

Por otro lado, las mezclas con residuo de ladrillo (RL) muestran una mayor intensidad en los valores de a* y b* en comparación con las mezclas con Rce. La mezcla con 10% de RL alcanza valores de a* (7.98) y b* (14.12), mientras que con 30% de RL se registran los valores más altos, a* (11.04) y b* (16.59). Esto sugiere que el residuo de ladrillo genera colores

significativamente más cálidos, con una marcada tendencia hacia tonos rojizos y amarillos. En general, las mezclas con RL presentan colores más saturados e intensos que aquellas con Rce, destacando su influencia en la coloración de las pastas.

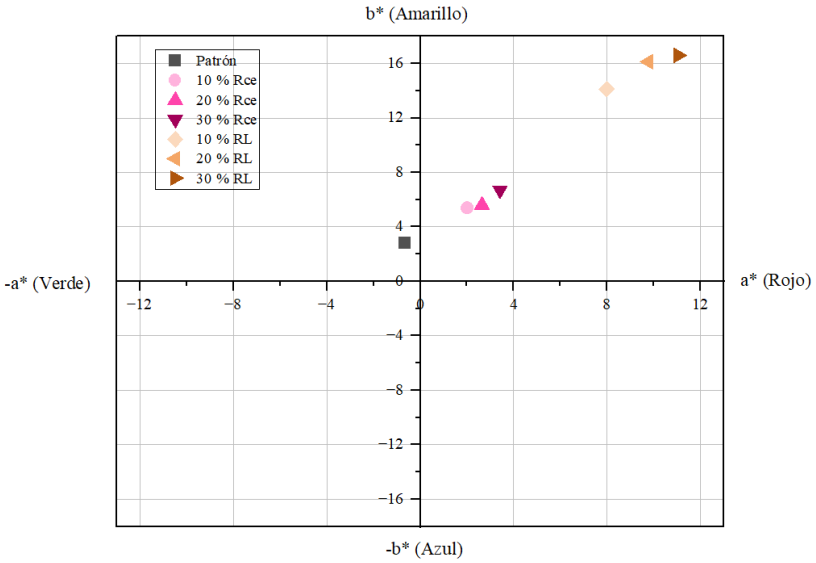


Figura 23: a vs b* de cada pasta.*

En la Figura 24 se analiza cómo varían la saturación (C*) y la luminosidad (L*) en las diferentes mezclas. La muestra patrón tiene la mayor luminosidad (L* = 88.42) y la menor saturación (C* = 2.90), lo que indica un color claro y poco intenso. Al incorporar residuo de cerámica (Rce), se observa una disminución progresiva en la luminosidad y un aumento en la saturación. Por ejemplo, la mezcla con 10% de Rce tiene una luminosidad de L* = 81.40 y una saturación de C* = 5.76, mientras que con 30% de Rce los valores cambian a L* = 76.38 y C* = 7.52. Esto refleja una transición hacia colores más oscuros y vívidos.

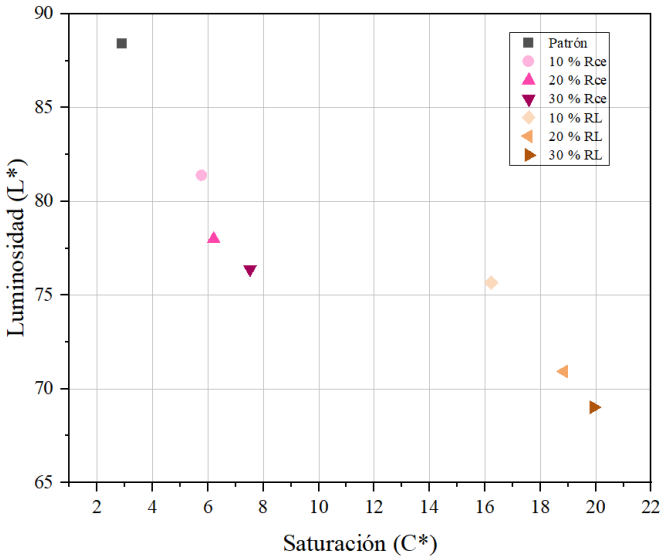


Figura 24: Variación de Saturación y Luminosidad de cada pasta.

Las mezclas con residuo de ladrillo (RL) muestran una tendencia más pronunciada en la reducción de la luminosidad y el incremento de la saturación. La mezcla con 10% de RL tiene valores de L* = 75.67 y C* = 16.22, mientras que con 30% de RL se registran los valores más extremos: L* = 69.02 y C* = 19.93. Esto evidencia que el residuo de ladrillo no solo genera colores más oscuros, sino también significativamente más vivos en comparación con el residuo de cerámica.

Estos resultados reflejan que, aunque tanto el residuo de cerámica como el de ladrillo afectan la coloración, el RL tiene un impacto más marcado en la intensidad y tonalidad cálida, mientras que el Rce genera cambios más sutiles.

Para comparar diferencias de color entre las distintas muestras, se calculó el parámetro de diferencia de color total (ΔE). En las Tablas 19, 20 y 21 se presentan los resultados de ΔE*76, obtenidos al usar el modelo CIELAB. En la Tabla 19, se comparan las mezclas con diferentes porcentajes de adición de residuo de cerámica (Rce) respecto a la mezcla patrón; en la Tabla 20, se analiza la diferencia de color entre la mezcla patrón y las mezclas con distintos porcentajes de residuo de ladrillo (RL); y en la Tabla 21, se evalúa la diferencia de color entre las mezclas con Rce y RL en los mismos porcentajes de adición.

***Tabla 19**: Diferencias de color total ΔE*76 de las mezclas con diferentes porcentajes de Rce.*

ΔE Rce			Coordenadas	Patrón	10% Rce	20% Rce	30% Rce
			L*	88,42	81,40	78,00	76,38
			a*	-0,65	2,01	2,65	3,41
Coordenadas	L*	a*	b*	2,83	5,40	5,61	6,70
Patrón	88,42	-0,65	2,83	0,00	7,94	11,28	13,28
10% Rce	81,40	2,01	5,40	7,94	0,00	3,46	5,37
20% Rce	78,00	2,65	5,61	11,28	3,46	0,00	2,09
30% Rce	76,38	3,41	6,70	13,28	5,37	2,09	0,00

Los resultados de la tabla 19 muestran que la mezcla patrón comparada con las mezclas que contienen residuo de cerámica (Rce) presenta variaciones notables. La diferencia de color entre la mezcla patrón y la de 10% Rce es de 7,94, lo que se clasifica como "grande" (ΔE 76: 6,0-12,0). Entre la mezcla patrón y la de 20% Rce, la diferencia aumenta a 11,28, también clasificada como "grande". Sin embargo, la mayor diferencia se observa entre la mezcla patrón y la de 30% Rce, con un valor de 13,28, lo que se clasifica como "muy grande" (ΔE 76 > 12,0). Al comparar las mezclas con diferentes porcentajes de Rce, se observa que la diferencia de 3,46 entre el 10% y el 20% Rce, así como la de 5,37 entre el 20% y el 30% Rce, se ubican en la categoría de "muy notable" (ΔE 76: 3,0-6,0), indicando un cambio de color perceptible pero no excesivamente drástico. En general, el análisis demuestra que a medida que se incrementa el porcentaje de residuo de cerámica en las mezclas, las variaciones de color aumentan, siendo más evidentes con mayores adiciones de Rce.

Al analizar la tabla 20 de las diferencias de color (ΔE 76) para las mezclas con residuo de ladrillo (RL), se observa que todas las mezclas con RL muestran un cambio cromático

considerable respecto a la mezcla patrón. La diferencia de color entre la mezcla patrón y la de 10% RL es de 19,09 (ΔE 76), lo que se clasifica como "muy grande" (ΔE 76 > 12,0). Esta diferencia aumenta a 24,31 (ΔE 76) para la mezcla con 20% RL y 26,50 (ΔE 76) para la mezcla con 30% RL, ambas también clasificadas como "muy grandes". Al comparar las mezclas con diferentes porcentajes de RL, se observa que la diferencia de 5,45 entre el 10% y el 20% RL se clasifica como "muy notable" (ΔE 76: 3,0-6,0), mientras que la diferencia de 7,73 entre el 20% y el 30% RL se considera "grande" (ΔE*76: 6,0-12,0). Esto indica que, al igual que con Rce, la adición de RL tiene un impacto significativo en el cambio cromático, aunque con diferencias algo menores en comparación con el residuo de cerámica, especialmente a los porcentajes más bajos.

Tabla 20: *Diferencias de color total ΔE*76 de las mezclas con diferentes porcentajes de RL.*

ΔE RL			Coordenadas	Patrón	10% RL	20% RL	30% RL
			L*	88,42	75,67	70,93	69,02
			a*	-0,65	7,98	9,77	11,04
Coordenadas	L*	a*	b*	2,83	14,12	16,12	16,59
Patrón	88,42	-0,65	2,83	0,00	19,09	24,31	26,50
10% RL	75,67	7,98	14,12	19,09	0,00	5,45	7,73
20% RL	70,93	9,77	16,12	24,31	5,45	0,00	2,34
30% RL	69,02	11,04	16,59	26,50	7,73	2,34	0,00

En la tabla 21 se observa que las diferencias de color son más pronunciadas en las mezclas con RL. Las diferencias entre la mezcla patrón y las de 10%, 20% y 30% RL son de 19,09, 24,31 y 26,50, respectivamente, todas clasificadas como "muy grandes" (ΔE 76 > 12,0), lo que indica un cambio cromático significativo. En comparación, las diferencias de color entre las mezclas con Rce y RL muestran que el residuo de ladrillo genera cambios más notorios, especialmente en los porcentajes bajos (10% RL vs. 10% Rce: 12,02). Sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de adición, las diferencias se vuelven menores (20% RL vs. 20% Rce: 10,31 y 30% RL vs. 30% Rce: 8,75), siendo estas últimas clasificadas como "muy notables" y "grandes". Esto sugiere que, aunque ambos residuos generan variaciones cromáticas, el residuo de ladrillo provoca cambios más intensos en los primeros porcentajes de adición.

Tabla 21: *Diferencias de color total ΔE*76 entre las mezclas con Rce y RL en los mismos porcentajes de adición.*

ΔE (RL vs RL)			Coordenadas	Patrón	10% RL	20% RL	30% RL
			L*	88,42	75,67	70,93	69,02
			a*	-0,65	7,98	9,77	11,04
Coordenadas	L*	a*	b*	2,83	14,12	16,12	16,59
Patrón	88,42	-0,65	2,83	0,00	19,09	24,31	26,50
10% Rce	81,40	2,01	5,40	7,94	12,02	16,87	18,97
20% Rce	78,00	2,65	5,61	11,28	10,31	14,53	16,48
30% Rce	76,38	3,41	6,70	13,28	8,75	12,61	14,50

Dados los resultados obtenidos se decidió seleccionar el 20% de reemplazo tanto para RL como para Rce, esto fundamentado en un análisis detallado de colorimetría y resistencia mecánica, considerando los requisitos estéticos y estructurales de un concreto arquitectónico. En términos cromáticos, esta proporción permitió una tonalidad cálida y homogénea, evitando los cambios sutiles del 10% y las variaciones excesivamente intensas del 30%, lo que favorece una estética controlada y equilibrada. Desde el punto de vista mecánico, los ensayos a 7 y 28 días, junto con el Índice de Actividad Puzolánica (IAP), demostraron que el 20% de RL y Rce mejoraba significativamente la resistencia del concreto. En particular, el RL al 20% superó la resistencia de la mezcla de referencia a los 28 días, lo que evidencia una reacción puzolánica efectiva y una óptima interacción con la matriz cementicia. Esta proporción no solo garantiza un adecuado desempeño estructural, sino que también contribuye a la sostenibilidad y viabilidad del concreto arquitectónico, al reutilizar materiales de diseño, reducir la huella de carbono y optimizar costos sin comprometer la estética ni la duración.

6.2. FASE II: Diseño y producción de microconcreto arquitectónico para la evaluación de propiedades

6.2.1. Producción de microconcretos

Índice de fluidez

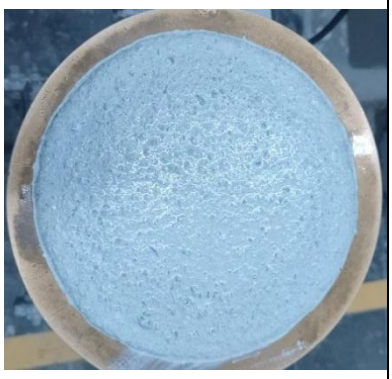
Se planteó la producción de microconcretos utilizando vidrio fino como reemplazo parcial de la arena, el objetivo fue encontrar el porcentaje óptimo que garantice una trabajabilidad adecuada, un acabado uniforme y el cumplimiento de los parámetros de diseño. Además, este análisis sirvió como base para desarrollar un concreto arquitectónico que priorizara el uso de agregados reciclados, alineándose con principios de sostenibilidad y un acabado estético uniforme. Para la producción de los especímenes (morteros), se tuvo en cuenta la relación cementante- arena (C: A) (1:2,75), usando materiales convencionales y no convencionales con una relación L/S de 0,44, donde se realizó corrección por humedad para cada uno de los agregados en cada mezcla. Se realizaron 3 mezclas diferentes, una de referencia y las otras dos con 20 y 40 % de vidrio molido como remplazo del agregado fino natural. Aclarando que el agregado fino (vidrio) que se utilizo fue el que paso tamiz #4. Sus respectivas dosificaciones se pueden ver en la tabla 22

Tabla 22: *Dosificaciones de los microconcretos a diseñar.*

Mezcla	Cemento (gr)	Arena (gr)	Vidrio (gr)	Agua (gr)	SP%	a/c
Patrón	600	1650	0	269,56	0,7	0,44
20%v	550	1210	302,5	245,99	0,5	0,44
40%v	500	825	550	222,82	0,4	0,44

Para obtener una mezcla fluida, que estuviera entre 110±5 cm de diámetro en la prueba en la mesa de flujo (NTC 111 – 5784), fue necesario utilizar un superplastificante (SP), (viscocrete 2000) en los porcentajes mencionados en la Tabla 22. Los diámetros obtenidos de cada mezcla estuvieron dentro del rango establecido, según la NTC 111, la trabajabilidad y los diámetros de cada mezcla se puede ver en la tabla 23.

Tabla 23: *Mezclas de Microconcretos, después de la meza de flujo.*

Mezcla de referencia 108 cm	20 % de vidrio 110 cm	40 % de vidrio 114 cm
		

Es importante mencionar que, para la elaboración de los morteros, no fue posible utilizar la mezcladora Hobart de 5 L, ya que los agregados finos, como la arena natural y el vidrio, no cumplían con las especificaciones necesarias para su uso, puesto que esta mezcladora solo admite materiales que pasen por el tamiz #16. Por esta razón, se optó por realizar las mezclas de manera manual, lo que incrementó ligeramente el tiempo requerido para cada preparación. En primer lugar, para la mezcla de referencia, se inició con la preparación de la pasta, mezclándola durante aproximadamente 1 minuto. Posteriormente, se añadió el agregado fino natural en condiciones SSS y se continuó mezclando durante 3 minutos hasta obtener una mezcla homogénea.

Para las mezclas con reemplazos del 20% y 40% de vidrio, se llevó a cabo un paso adicional: se mezclaron previamente la arena y el vidrio para garantizar una distribución uniforme de las partículas de vidrio en la matriz. Una vez homogeneizada esta combinación, se preparó la pasta y se siguió el mismo procedimiento que en la mezcla de referencia.

6.2.2. Evaluación de propiedades de los Microconcretos.

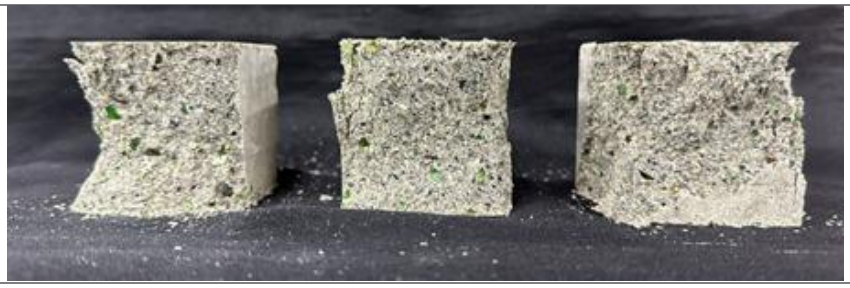
- Resistencia a la compresión (ASTM C 39) (NTC 673)

La resistencia a compresión de las tres mezclas de microconcretos fue evaluada a los 7 28 y 90 días. Este análisis permitió identificar la mezcla con el mejor desempeño mecánico,

sirviendo como base para la producción del concreto definitivo. Los resultados a compresión de cada mezcla se pueden ver en la tabla 24 y figura 25.

Tabla 24: *Falla por compresión en las mezclas de microconcretos diseñadas.*

Falla por compresión de los cubos de microconcreto patrón a los 28 días de curado

Falla por compresión de los cubos de microconcreto con el 20% de vidrio a los 28 días de curado

Falla por compresión de los cubos de microconcreto con el 40% de vidrio a los 28 días de curado


En la tabla 24 se puede detallar que las fallas de los cubos revelan diferencias significativas en el comportamiento mecánico de las mezclas evaluadas. En la mezcla de referencia, las fracturas son uniformes y bien definidas, mostrando planos de falla típicos de compresión (ver, Nilson, A. 2014), que indican una buena cohesión interna entre los agregados y la matriz de cemento, sin presencia evidente de fisuras adicionales o desprendimientos. Esto refleja una distribución adecuada de las tensiones y una resistencia homogénea en el material.

Por otro lado, las fallas de las mezclas con 20 % y 40 % de vidrio presentan patrones más irregulares. Las fracturas son más abiertas y desiguales, reflejando puntos de debilidad en las

interfaces vidrio-cemento debido a la baja adherencia del vidrio, que actúa más como un relleno inerte que como un agregado funcional. En el estudio realizado por Cano y Cruz (2017), se observó que las mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo presentaron puntos de debilidad similares en las interfaces vidrio-cemento. Estas diferencias en las fallas evidencian que el incremento del contenido de vidrio compromete la integridad estructural del microconcreto, especialmente a largo plazo.

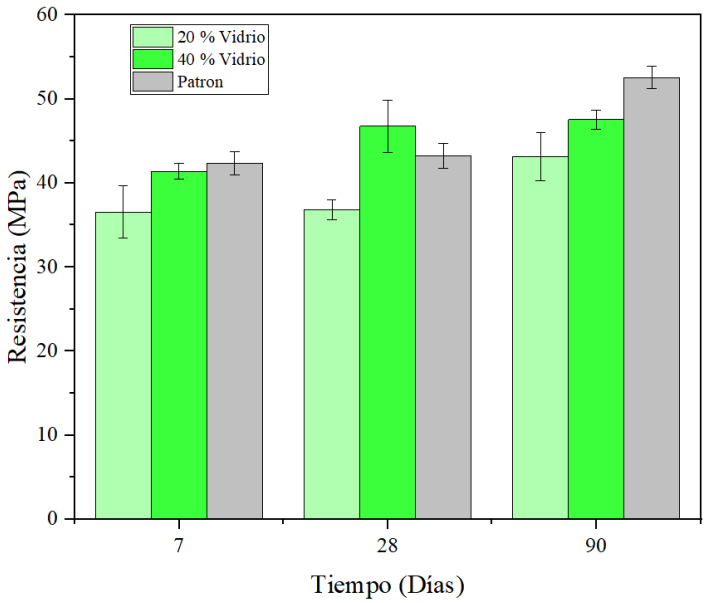


Figura 25: Comparación de resultados de resistencia a la compresión para las Mezclas de microconcretos.

Los resultados de la figura 25 muestran un comportamiento diferenciado entre las mezclas de microconcreto con reemplazo parcial de arena por vidrio y la mezcla de referencia. Se observa que la mezcla con un 40 % de vidrio presenta una resistencia superior en todas las edades evaluadas en comparación con la mezcla con un 20 % de vidrio. Este fenómeno puede explicarse por la mayor presencia de sílice amorfa en el vidrio, lo que favorece reacciones puzolánicas con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. Según Shi, Wu, Riefler y Wang (2005), la reacción puzolánica del vidrio molido mejora la densidad de la matriz cementicia al generar productos secundarios como silicatos de calcio hidratados (CSH), que contribuyen a una microestructura más compacta. En la mezcla con un 20 % de vidrio, la cantidad de partículas activas de sílice es menor, lo que limita esta reacción y reduce el beneficio en términos de resistencia mecánica.

Por otro lado, al comparar la mezcla con un 40 % de vidrio con la mezcla de referencia (100 % arena), se observa que, a partir de los 28 días, la mezcla con vidrio logra alcanzar valores de resistencia similares o incluso superiores. Esto sugiere que, aunque el vidrio presenta una menor adherencia inicial con la pasta de cemento debido a su superficie lisa y no porosa, a largo plazo su contribución puzolánica compensa esta deficiencia inicial. Estudios como los de Ismail y Al-Hashmi (2009**)** han demostrado que el vidrio reciclado en morteros y concretos desarrolla resistencia progresiva debido a la lenta pero continua reacción

puzolánica. Además, la menor absorción de agua del vidrio en comparación con la arena natural ayuda a mantener una mejor relación agua/cemento efectiva en la mezcla, lo que favorece una hidratación más completa del cemento y, por ende, una mayor resistencia final.

Además, es importante señalar que la alta variación en la resistencia de cada cubo de ensayo, representada por la desviación estándar, se debe en parte a la falta de uniformidad en el proceso de apisonamiento de la mezcla en los moldes. Este procedimiento no se realizó con una sola persona encargada, lo que podría haber afectado la consistencia en el proceso de apisonado. El apisonamiento adecuado es crucial para garantizar que cada cubo de ensayo tenga una compactación uniforme, ya que la fuerza vertical y el movimiento de la varilla deben aplicarse de manera consistente en cada mezcla. Si el apisonamiento lo realiza más de una persona, puede haber variaciones en la intensidad de la fuerza aplicada y en la distribución de la mezcla en el molde, lo que genera diferencias en la densidad y homogeneidad del concreto en cada cubo. Estas diferencias, a su vez, impactan en la resistencia a compresión medida en los ensayos, resultando en mayores desviaciones estándar.

Finalmente, la comparación entre las tres mezclas sugiere que el reemplazo del 40 % de arena por vidrio es más beneficioso que el 20 %, evidenciando que un mayor contenido de vidrio no solo mejora la resistencia mecánica, sino que también contribuye a la sostenibilidad del material al reducir el uso de agregados naturales. Además, dado que el objetivo es desarrollar un concreto arquitectónico, el mayor porcentaje de vidrio en la mezcla permitirá una mejor visualización del material reciclado, aportando un valor estético adicional.

Esto coincide con la investigación realizada por Segura Terrones et al. (2022), quienes muestran que el uso de vidrio reciclado en concreto puede sustituir satisfactoriamente a los agregados en porcentajes de 25 % y 50 %, mejorando la resistencia mecánica y contribuyendo a la sostenibilidad del material al reducir el uso de agregados naturales.

- Densidad, absorción y porosidad (ASTM C 642)

Las propiedades físicas evaluadas para los microconcretos óptimos se resumen en la tabla 25. El análisis de las propiedades físicas de los microconcretos muestra que la adición de vidrio mejora ciertas características del concreto. La mezcla con 40% de vidrio presenta la menor absorción de agua (8,47%) y el menor volumen de vacíos (16,84%), lo que indica una estructura más densa y menos porosa. Esto es consistente con estudios previos que han demostrado que el vidrio fino actúa como un relleno efectivo, reduciendo la porosidad y mejorando la durabilidad del concreto (Jahami et al., 2022).

En términos de densidad aparente, las mezclas con vidrio muestran una ligera disminución en comparación con la mezcla de referencia, pero la diferencia no es significativa. La mezcla con 40% de vidrio tiene una densidad de 2,39 g/cm³, mientras que la mezcla patrón tiene 2,49 g/cm³. Esta pequeña variación sugiere que la inclusión de vidrio no compromete la integridad estructural del concreto, manteniendo una densidad adecuada para aplicaciones prácticas.

Dado lo anterior, es importante concluir que la incorporación de vidrio reciclado como reemplazo de arena en microconcretos no solo es una alternativa sostenible, sino que también

mejora ciertas propiedades físicas del material. La reducción en la absorción de agua y el volumen de vacíos sugiere una mayor durabilidad y resistencia del concreto.

Tabla 25: *Resultados del ensayo densidad, absorción y porosidad en mezclas de microconcreto a los 28 días de curado.*

Mezclas de microconcreto	**Absorción después de Inmersión y Ebullición *(Ae)* (%)**	**Densidad Aparente *(ρ_a)* (g/cm3)**	**Volumen de Vacíos *(V_v)* (%)**
20 % Vidrio	8,90 ±0,35	2,47 ±0,00	17,99 ±0,54
40 % Vidrio	8,47 ±0,14	2,39 ±0,00	16,84 ±0,25
Mezcla patrón	8,85 ±0,16	2,49 ±0,021	18,06 ±0,40

- Prueba de succión capilar (ASTM C 1585-04)

En la figura 26 se muestra cómo el aumento del contenido de vidrio en la mezcla influye significativamente en la succión capilar. La mezcla con un 40 % de vidrio reemplazando la arena exhibe una mayor absorción inicial en comparación con las otras mezclas, mientras que la mezcla con un 20 % de vidrio tiene un comportamiento ligeramente superior a la mezcla patrón. Esto ocurre debido a que el vidrio actúa como un material inerte, pero su geometría y textura superficial pueden aumentar la capilaridad al generar microhuecos en la matriz, favoreciendo el paso del agua durante las primeras etapas de absorción. Sin embargo, al aumentar el contenido de vidrio, el exceso de microvacíos amplifica este fenómeno, resultando en valores de succión mayores.

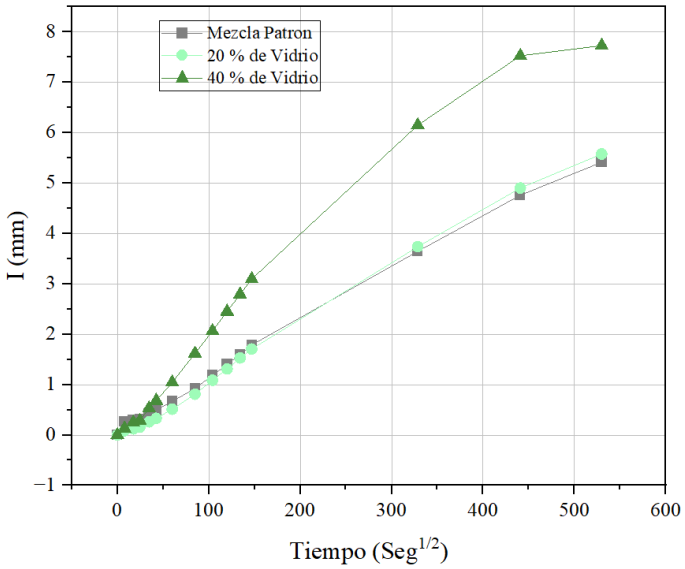


Figura 26: Comparación de Succión capilar para cada muestra de Microconcreto

De la tabla 26 se puede ver que la absorción secundaria (**Ss**) refleja diferencias en el diseño de las mezclas. La mezcla patrón tiene la menor **Ss** (0,0096 mm/s$^{1/2}$), seguida de la mezcla con 20 % de vidrio (0,01025 mm/s$^{1/2}$). Esto muestra cómo el reemplazo parcial con vidrio afecta el transporte de agua en las etapas posteriores. En particular, la mezcla con 20 % de vidrio presenta un comportamiento más controlado en comparación con la mezcla con 40 % de vidrio, la cual alcanza un **Ss** de 0,0126 mm/s$^{1/2}$. Este comportamiento puede explicarse por la menor reactividad y mayor rigidez del vidrio, que contribuyen a la formación de caminos preferenciales para la entrada de agua.

Tabla 26: *Tasa de absorción y coeficiente de correlación lineal correspondientes a los microconcretos*

Mezcla	Absorción inicial (Si) (mm/s^1/2)	R	Absorción Secundaria (Ss) (mm/s^1/2)	R
Patron	0,01134	0,98869	0,0096	0,99656
20 % de Vidrio	0,01171	0,98695	0,01025	0,99505
40 % de Vidrio	0,0215	0,99433	0,0126	0,94664

En un concreto arquitectónico, como el del presente proyecto, el uso de vidrio puede ser beneficioso debido a sus propiedades estéticas y sostenibles. Sin embargo, su influencia en la succión capilar debe ser considerada cuidadosamente, especialmente en mezclas con altos porcentajes de reemplazo. La mayor succión capilar inicial y secundaria podría afectar la durabilidad y el desempeño en condiciones de exposición a humedad.

6.3. FASE III: Diseño y producción de concretos arquitectónicos para la evaluación de propiedades

6.3.1. Producción de concretos

Determinación del contenido de superplastificante en las mezclas de concreto

Con el porcentaje de residuos de Rce y RL establecido en un 20% como reemplazo parcial del cemento, fue fundamental controlar la fluidez del concreto para garantizar un desempeño óptimo. El objetivo principal era mantener una resistencia a compresión dentro del rango de 28 MPa y obtener un concreto fluido que presentara un asentamiento de 18 a 20 cm. Para lograr estas condiciones sin comprometer la resistencia, se optó por el uso de un superplastificante, ya que incrementar la relación agua-sólidos en la mezcla afectaría negativamente las propiedades mecánicas del concreto. Este aditivo permitió mantener una trabajabilidad adecuada, asegurando que la mezcla cumpliera con los parámetros de diseño sin sacrificar su resistencia y durabilidad.

Es importante mencionar que este procedimiento se aplicó únicamente a la mezcla de referencia. Para determinar el porcentaje óptimo de superplastificante en las mezclas de concreto, se diseñan cuatro mezclas siguiendo las directrices establecidas en el ACI 211.1. donde los parámetros de diseño se pueden ver en la tabla 27.

Tabla 27: *Parámetros de diseño para los concretos.*

Propiedades del Concreto	
Asentamiento (Manejabilidad) (cm)	18
Resistencia de diseño ($f'c$) (Mpa)	28

La relación agua/cemento (A/C) y el porcentaje de superplastificante (Sp) se ajustaron en cada mezcla con el objetivo de evaluar su trabajabilidad, consistencia y desempeño. Dado que las mezclas se prepararon manualmente, la trabajabilidad no se midió mediante la prueba de asentamiento tradicional, sino que se evaluó utilizando la mesa de flujo. Este enfoque se adoptó para optimizar el uso de los materiales, ya que únicamente se elaboraron dos cilindros de prueba por mezcla, priorizando minimizar el desperdicio.

Además, este método permitió analizar no solo la trabajabilidad, sino también observar de manera práctica la textura y la consistencia de las mezclas, lo que complementa el análisis mecánico mediante la resistencia a la compresión a los 7 días. Los resultados obtenidos para cada mezcla, incluyendo la textura y la trabajabilidad, se detallan en la tabla 28, los datos relacionados con el comportamiento mecánico, específicamente los valores de resistencia a la compresión a los 7 días se presentan en la figura 27 y los modos de falla de los cilindros se pueden ver en la tabla 28.

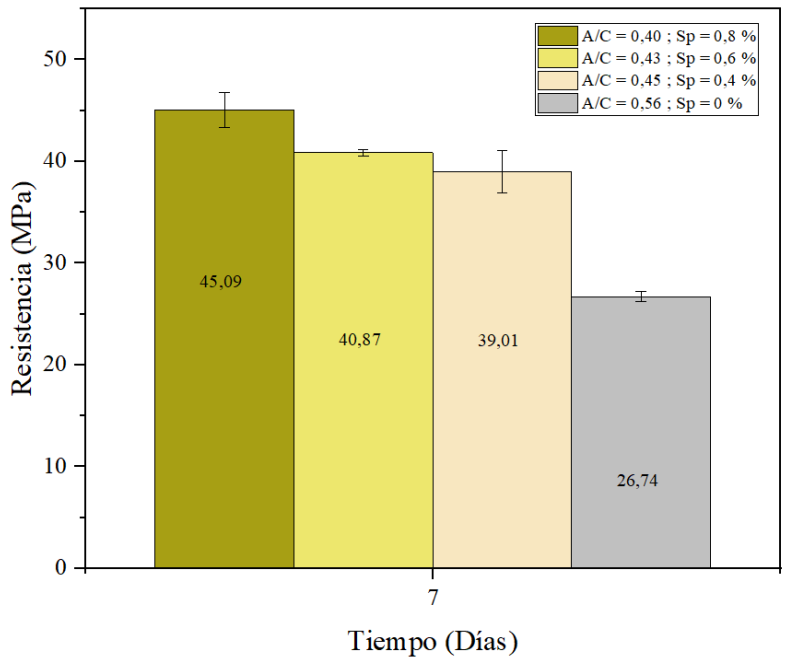
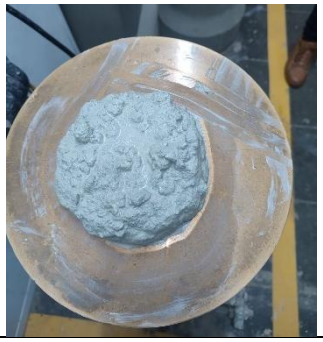


Figura 27: Resultados a Compresión de cilindros de prueba a 7 días.

Tabla 28: *Trabajabilidad y modo de falla de cilindros de prueba.*

Muestra después del procedimiento de la mesa de flujo	Falla en las muestras después de la prueba de compresión
A/C: 0,45 Sp: 0,4%	
	
A/C: 0,43 Sp: 0,6	
	
A/C: 0,4 Sp: 0,8%	
	
A/C: 0,56 Sp: 0 %	
	

La primera mezcla (A/C = 0.40; Sp = 0.8%) logró la resistencia más alta a los 7 días, pero presentó un problema significativo de exudación, como se observa en la tabla 28, lo que la hace menos adecuada para aplicaciones donde la calidad superficial, cohesión y durabilidad serán críticas. Estos problemas de exudación pueden generar defectos en la superficie y afectar la integridad del concreto a largo plazo.

La mezcla con A/C = 0.45 y Sp = 0.4%, aunque tuvo un buen desempeño en términos de resistencia, mostró una ligera tendencia a la pérdida de resistencia y menor estabilidad, lo que la considera como una opción menos competitiva frente a las otras alternativas.

La mezcla A/C = 0.56 y Sp = 0% no cumple con los requisitos esperados debido a su baja resistencia y trabajabilidad limitada, lo que la descarta como una opción viable para concreto estructural o arquitectónico.

Por otro lado, la mezcla con A/C = 0,43 y Sp = 0,6% se destaca como la mejor, al contar con un equilibrio óptimo entre resistencia, trabajabilidad y estabilidad, sin presentar problemas significativos de exudación o segregación de agregados, según lo evidenciado en las observaciones de la falla de los cilindros. Esta combinación la hace especialmente adecuada para aplicaciones donde se requieren propiedades mecánicas confiables y un acabado uniforme y cohesivo, por lo tanto, se decidió utilizar estos parámetros para todos los diseños de las muestras de concreto.

Elaboración de las mezclas de diseño del concreto arquitectónico

Teniendo claro el ajuste de las proporciones de agua/cemento y el contenido de aditivo superplastificante para garantizar una trabajabilidad óptima y una mezcla homogénea, y con la incorporación de pigmentos en un 20% como reemplazo parcial del cemento, se procedió a la producción de cinco mezclas de concreto.

Considerando los parámetros de diseño establecidos (Tabla 27), fue fundamental determinar la fracción volumétrica óptima de los agregados para las mezclas de concreto. Este análisis se llevó a cabo utilizando el método de Fuller y Thompson, el cual permite optimizar la granulometría para mejorar la compactación y trabajabilidad del concreto.

Tras evaluar diferentes combinaciones, se identificó que la proporción ideal para la mezcla CAAN corresponde a un 50 % de arena y un 50 % de grava, mientras que, en el caso de la mezcla CAAR, la fracción volumétrica óptima es de 60 % para el agregado grueso reciclado y 40 % para la arena. Los ajustes granulométricos obtenidos mediante el método de Fuller y Thompson para ambas mezclas se presentan en la Figura 28.

Teniendo en cuenta la fracción para cada agregado, se procedió a diseñar las mezclas de concreto siguiendo los pasos establecidos en la norma ACI 211.1. La tabla 29 presenta la dosificación detallada para cada mezcla, garantizando que los parámetros de resistencia, trabajabilidad y durabilidad se ajustarán a los requisitos del diseño.

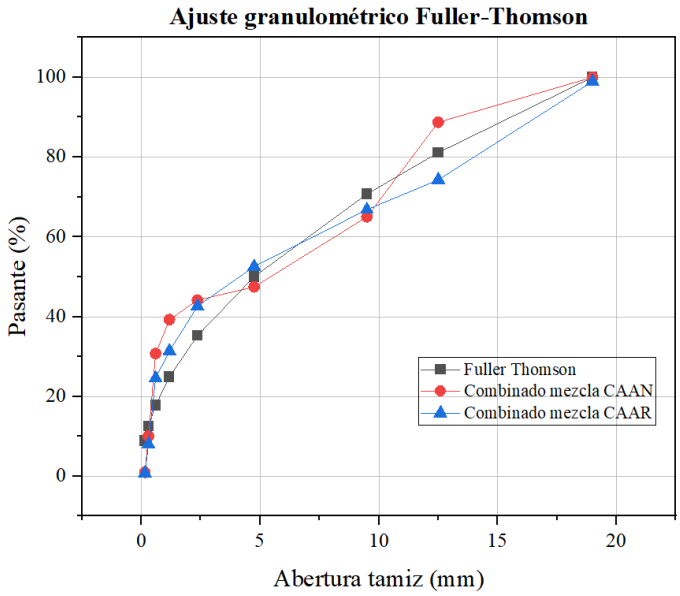


Figura 28: Ajuste granulométrico de Fuller y Thomson.

La Tabla 29 muestra que la mezcla CAAR requirió una cantidad de agua significativamente mayor en comparación con la mezcla CAAN. Esto se debe a que los agregados reciclados provenientes de concreto triturado, presentan una mayor cantidad de poros internos en comparación con los agregados naturales. Estos poros, resultado de la hidratación incompleta del cemento en el concreto original y de las microfisuras generadas durante su trituración (Neville, AM, 2011), incrementan la absorción de agua, afectando la consistencia de la mezcla.

Tabla 29: *Dosificación de las mezclas de concreto.*

Material	CAAN	CAAR	CAARRce	CAARRL	CAARV
	Sp (%): 0,6 A/C: 0,43	Sp (%): 0,6 A/C: 0,43	Sp (%): 0,6 A/C: 0,43	Sp (%): 0,8 A/C: 0,45	Sp (%): 0,6 A/C: 0,43
	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3
CEMENTO	400	400	320	320	400
GRAVA	890,31	1047,65	1043,94	1031,59	523,82
ARENA	891,6	689,92	687,48	679,35	413,95
Superplastificante	2,4	2,4	2,4	3,2	2,4
Agua triple sss	12,01	41,85	41,71	41,21	20,88
Agua de mezclado	172	172	172	180	172
Rce			80		
RL				80	
Vidrio grueso					531,68
Vidrio fino					257,43

Es importante destacar que, en la mezcla CAAN (según la tabla 29), el superplastificante ViscoCrete logró una reducción de agua del 12,74 %, un valor cercano al rango especificado en su ficha técnica (15 % - 35 %). Aunque esta reducción está ligeramente por debajo del límite superior óptimo, la dosificación utilizada cumple con los parámetros recomendados, garantizando un desempeño adecuado del aditivo en términos de trabajabilidad y reducción del contenido de agua en la mezcla.

En el caso de la mezcla CAARRce, el reemplazo del pigmento Rce fue un 20 %, manteniendo las mismas fracciones volumétricas de los agregados utilizados en la mezcla CAAR, tal como se observa en la tabla 29. Este ajuste permitió evaluar el impacto del pigmento en la mezcla sin alterar la proporción de los demás componentes.

Sin embargo, al trabajar con la mezcla CAARRL, se presentó una trabajabilidad insuficiente a pesar de conservar la misma relación agua/cemento (A/C) y el porcentaje de superplastificante (Sp) que en las mezclas anteriores. Para confirmar esta observación, se realizó el ensayo de asentamiento según la NTC 4023, donde se evidenció que la parte superior de la mezcla se desmoronó completamente, indicando una baja fluidez. Este comportamiento se atribuye a la alta porosidad y gran área superficial del polvo de ladrillo, resultado de su trituración. Estas características aumentan la demanda de agua, ya que las partículas finas presentan microcavidades que retienen el agua rápidamente, además de una superficie rugosa que incrementa la fricción interna en la mezcla. Además, su naturaleza cerámica e higroscópica intensifica esta absorción, reduciendo la cantidad de agua libre disponible y dificultando la fluidez del concreto (Silva, RV, de Brito, J, Dhir, RK, 2019).

Ante esta situación, se decidió aumentar la relación agua/cemento (A/C) a 0,45 para mejorar la trabajabilidad del concreto. Asimismo, se incrementó el porcentaje de superplastificante (Sp) al 0,8 %, lo que optimizó la fluidez de la mezcla y compensó la mayor demanda de agua generada por la presencia del polvo de ladrillo. La fracción volumétrica de los agregados se mantuvo igual que en la mezcla CAAR, de acuerdo con la tabla 29 de dosificación.

Finalmente, en la mezcla CAARV, se diseñó un concreto fluido utilizando un 50 % de grava gruesa reciclada y un 50 % de vidrio grueso (material retenido en el tamiz #4), mientras que la arena fue reemplazada en un 40 % por vidrio fino (material que pasa el tamiz #4). Como se especifica en la tabla 29, este parámetro ya había sido definido en etapas previas del estudio. Para el diseño de la mezcla, se siguieron las indicaciones del ACI 211, asegurando que tanto el vidrio grueso como el vidrio fino fueran reemplazados en función del volumen del agregado grueso reciclado y la arena, respectivamente.

6.3.2. Preparación de Concretos

Para el desarrollo de esta investigación, se fabricaron 16 cilindros de 7,5 cm de diámetro por 15 cm de altura y dos placas de 30x30x5 cm de concreto por cada mezcla estudiada. La mezcla de los materiales se realizó utilizando una mezcladora horizontal (ver figura 29), que permitió obtener una mezcla homogénea en un tiempo de 4 minutos. la figura 29 también permite observar la mezcla CAAN después de completar el proceso de homogeneización.



Figura 29: mezcladora horizontal

Siguiendo las normas ASTM C 192 y NTC 1377, se elaboraron cilindros y placas de concreto para las mezclas estudiadas (Ver figuras 30 y 31). El proceso de apisonamiento de la mezcla fue realizado por una sola persona, con el objetivo de garantizar una compactación uniforme en todas las muestras. Este procedimiento fue esencial para asegurar que la fuerza vertical y el movimiento de la varilla se apliquen de manera consistente en cada mezcla, evitando variaciones que puedan afectar los resultados (Ver figura 30).



Figura 30: Apisonamiento de la mezcla CAAN, en los moldes de placas.



Figura 31: Cilindros con la mezcla CAAN.

6.3.3. Resultados de ensayos en estado fresco y endurecido para las mezclas de concreto

- Ensayos de asentamiento en estado fresco (ASTM C 1017) (NTC 4023).

En la tabla 30 se muestran los asentamientos de las 4 mezclas realizadas. El diseño de las mezclas tenía como objetivo obtener un asentamiento de 18 cm, y los resultados muestran que, aunque las mezclas CAAN y CAAR lograron valores cercanos (19 cm, lo que es aceptable según la norma NTC 4023), las mezclas con reemplazo parcial de cemento por residuos (CAARRce y CAARRL) alcanzaron solo 17 cm, requiriendo ajustes. La mezcla CAARRL inicialmente presentó un asentamiento muy bajo, y al incrementar la relación agua-cemento de 0.43 a 0.45 y el superplastificante a 0.8 %, se logró mejorar la fluidez, pero esto aumentó significativamente la exudación. Según la norma, los valores de asentamiento obtenidos son consistentes con las especificaciones, pero las diferencias en fluidez entre mezclas sugieren que los agregados reciclados y los residuos incorporados afectan la trabajabilidad.

La exudación observada en las mezclas con agregados reciclados (CAAR, CAARRce y CAARRL) se debe a la porosidad de estos materiales, Los agregados reciclados tienden a tener una mayor porosidad en comparación con los agregados naturales, lo que les permite retener más agua inicialmente. Durante el asentamiento, esta agua es liberada, contribuyendo al fenómeno de exudación (Bedoya, C., & Dzul, L., 2015). Esto se agrava cuando hay un exceso de agua libre, como en CAARRL, donde el aumento de la relación agua-cemento y del superplastificante amplificó este fenómeno. En contraste, la mezcla CAAN, que utiliza agregados naturales, no presentó exudación debido a su mayor densidad y estabilidad.

En la figura 32 se observa un ensayo de asentamiento realizado sobre la mezcla CAARV. El asentamiento obtenido fue de 15 cm, inferior al diseño esperado de 18 cm, lo que evidencia una disminución en la fluidez de la mezcla. Este comportamiento puede estar relacionado con la presencia de vidrio, ya que sus partículas, especialmente las finas, tienen una superficie lisa y no porosa que dificulta la retención de agua en la matriz del concreto. Esto puede favorecer la exudación, como se observa en la acumulación de agua alrededor de la base del cono, dado que las partículas de vidrio no contribuyen a la cohesión de la mezcla en la misma medida que los agregados naturales. Adicionalmente, el vidrio puede generar un

desequilibrio en la granulometría, promoviendo una segregación parcial que afecta tanto la trabajabilidad como la uniformidad de la mezcla. Es necesario ajustar la dosificación del agua o emplear aditivos para mejorar la cohesión y mitigar el efecto del vidrio en la exudación.

Tabla 30: *Ensayo de asentamiento.*

<table>
<tr><td colspan="2">Prueba de Asentamiento</td></tr>
<tr><td>Mezcla CAAN
Asentamiento: 19 cm</td><td>Mezcla CAAR
Asentamiento: 19 cm</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Mezcla CAARRce
Asentamiento: 17 cm</td><td>Mezcla CAARRL
Asentamiento: 17 cm</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
</table>



Figura 32: Mezcla CAARV, Asentamiento: 15 cm

Para observar mejor la distribución de los agregados y examinar en detalle la textura y el color proporcionados por los residuos de cerámica (Rce), los residuos de ladrillo (RL) y el vidrio se cortaron algunos cilindros de las mezclas de concreto realizadas. Este análisis permitió evaluar las características estéticas y estructurales del concreto arquitectónico modificado.

En las figuras 33, 34, 35, 36 y 37 se pueden observar los cilindros de cada mezcla de concreto.



Figura 33: Cilindros CAAR



Figura 34: Cilindros CAAN

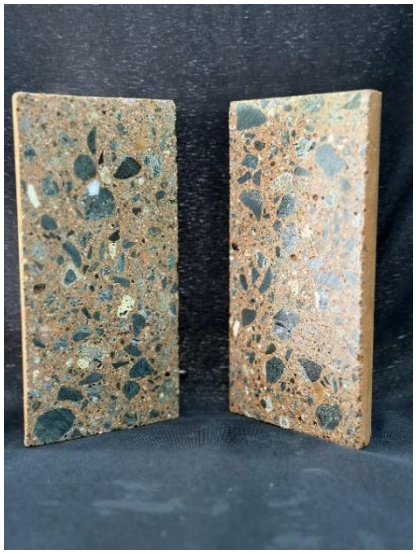


Figura 35: Cilindros CAARRL



Figura 36: Cilindros CAARRce



Figura 37: Cilindros CAARV

En las mezclas CAAR y CAAN (Ver figuras 33 y 34), se observa un predominio de tonos grises característicos de mezclas con agregados naturales y reciclados. CAAN presenta un color más uniforme y homogéneo, reflejando la ausencia de materiales reciclados y una mayor densidad de los agregados naturales. En contraste, CAAR muestra ligeras variaciones en el tono gris, lo que sugiere la influencia de los agregados reciclados, que contienen restos de mortero adherido y tienden a generar heterogeneidad visual. Las mezclas CAARRL, CAARRce y CAARV de las figuras 35, 36 y 37 respectivamente, presentan una mayor diversidad de colores: CAARV destaca por sus tonos verdosos, producto de la incorporación de vidrio reciclado; CAARRL exhibe un marcado color rojizo debido al polvo de ladrillo, mientras que CAARRce combina tonalidades rojizas y grises, relacionadas con los residuos de cerámica.

En términos de distribución de los agregados, CAAN presenta una distribución uniforme, lo que favorece un desempeño mecánico estable y homogéneo. CAAR, aunque también muestra

una distribución adecuada, refleja una ligera heterogeneidad debido a las propiedades de los agregados reciclados. CAARV exhibe una buena dispersión de los fragmentos de vidrio (Ver figura 36), aunque en algunos puntos se perciben concentraciones locales que podrían afectar las propiedades mecánicas. CAARRL, con residuos de ladrillo, presenta una buena integración de los materiales, pero los tonos rojizos del ladrillo destacan, evidenciando cierta falta de homogeneidad. Finalmente, en CAARRce, los residuos de cerámica parecen estar bien incorporados a la matriz, lo que sugiere una integración más eficiente al concreto arquitectónico. Estos factores reflejan la complejidad de trabajar con materiales reciclados en términos de estética y desempeño estructural.

- Ensayos en estado endurecido.

    - Resistencia a la compresión (ASTM C 39) (NTC 673)

El modo de falla por compresión en las mezclas de concretos diseñadas se presentan en la Tabla 31, mientras que en la figura 38 se muestra la tendencia y la comparación de las resistencias obtenidas a lo largo de las tres edades de curado consideradas.

Tabla 31: *Falla por compresión en las mezclas de concretos diseñadas*

Falla por compresión de los cilindros de la mezcla CAAN a los 28 días de curado

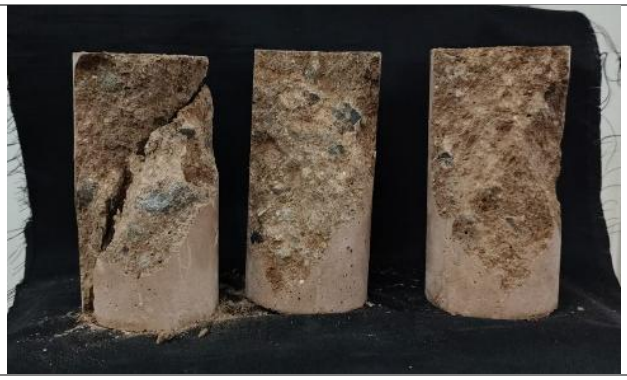
Falla por compresión de los cilindros de la mezcla CAAR a los 28 días de curado


Tabla 31. Continuación

Falla por compresión de los cilindros de la mezcla CAARRce a los 28 días de curado



Falla por compresión de los cilindros de la mezcla CAARRL a los 28 días de curado



Falla por compresión de los cilindros de la mezcla CAARRV a los 28 días de curado



En la mezcla patrón (CAAN), con agregados naturales, las fallas observadas en las imágenes de la tabla 31, son regulares y muestran una buena cohesión interna del material. Los agregados parecen estar bien distribuidos, proporcionando una textura homogénea, característica esperada en un concreto con materiales estándar. En comparación, la mezcla CAAR, que utiliza grava reciclada de residuos de construcción, presenta fallas más irregulares y fragmentaciones pronunciadas, lo que sugiere una posible menor cohesión interna debido a la naturaleza heterogénea y la mayor porosidad de los agregados reciclados (Martínez-Soto, I. E., & Mendoza-Escobedo, C. J. (2006) (Mehta, PK, Monteiro, PJM. 2014).

Sin embargo, los agregados siguen siendo visibles y parecen estar distribuidos adecuadamente en la matriz.
En el caso de las mezclas CAARRce y CAARRL, que incluyen residuos de cerámica y ladrillo como reemplazo parcial del cemento, se aprecia un cambio notable en la textura y el color. La cerámica le otorga un tono más cálido y rojizo al concreto, mientras que los residuos de ladrillo generan una textura algo rugosa y colores terrosos, que podrían ser atractivos para aplicaciones arquitectónicas. Estas mezclas también muestran fallas que revelan un material más poroso, pero con un patrón consistente de fractura, lo que indica que los agregados están razonablemente bien integrados.

Finalmente, la mezcla CAARV, que incorpora vidrio grueso y fino como sustituto parcial de la grava y arena, respectivamente, exhibe una textura distintiva. El vidrio fino aporta un acabado más suave y brillante, mientras que el vidrio grueso aporta una apariencia estética singular, con partículas reflejantes visibles en la superficie. Las fallas son menos uniformes, posiblemente debido a la heterogeneidad introducida por el vidrio, pero esta característica puede aprovecharse para enfatizar el carácter arquitectónico del concreto. En general, los materiales reciclados no solo afectan la resistencia mecánica, sino que también aportan propiedades visuales y texturales únicas que enriquecen el diseño arquitectónico.

El análisis de las resistencias mecánicas de las diferentes mezclas de concreto a lo largo del tiempo (ver figura 38) resalta las propiedades particulares de los materiales reciclados empleados. La mezcla patrón (CAAN), compuesta por agregados naturales, alcanzó una resistencia de 49,95 MPa a los 28 días y 63,27 MPa a los 90 días, destacándose como la mezcla más consistente en términos de resistencia. Sin embargo, presentó la mayor variabilidad en los resultados. Durante el proceso de fundición, la mezcla perdió fluidez progresivamente, lo que afectó negativamente la uniformidad en la distribución de los componentes. Esta pérdida de trabajabilidad resultó en una mayor segregación y formación de vacíos en algunos cilindros, lo que incrementó la desviación estándar (ver figura 30). Por otro lado, en las mezclas subsecuentes se implementaron ajustes en el manejo y dosificación, lo que permitió mejorar la fluidez y la homogeneidad, reduciendo considerablemente la separación estándar y garantizando resultados más consistentes.

En comparación, la mezcla CAAR, que utilizó grava reciclada proveniente de residuos de construcción, alcanzó 46,62 MPa y 54,99 MPa a los 28 y 90 días, respectivamente (Ver figura 38). Aunque los residuos de construcción demostraron ser un sustituto adecuado para los agregados naturales, su rendimiento fue ligeramente inferior debido a las variaciones inherentes en la calidad y propiedades de los residuos reciclados. Estos materiales, al ser más angulares y tener una mayor absorción de agua, pueden dificultar la compactación y disminuir la resistencia, especialmente en edades tempranas. A pesar de estas diferencias, la mezcla CAAR muestra un desempeño adecuado y resalta el potencial de los materiales reciclados como alternativa sostenible, con una resistencia que, aunque inferior a la de la mezcla patrón, sigue superando el objetivo de diseño de 28 MPa. a los 28 días.

Por otro lado, en la figura 38 se puede analizar que las mezclas con reemplazo parcial de cemento, como CAARRce y CAARRL, muestran un comportamiento interesante. A los 28 días, CAARRce alcanzó 37,32 MPa y los 90 días, 46,54 MPa, mientras que CAARRL obtuvo 38,82 MPa a los 28 días y 39,65 MPa a los 90 días. Ambos residuos, cerámica y ladrillo,

poseen propiedades puzolánicas debido a su alto contenido de sílice y alúmina, lo que les permite reaccionar con la cal liberada durante la hidratación del cemento, formando compuestos adicionales (como silicatos de calcio hidratados) que mejoran la resistencia a largo plazo (Mehta, PK. Monteiro, PJM. 2014). Sin embargo, la reactividad puzolánica es limitada en comparación con el cemento Portland, lo que explica por qué estas mezclas presentan resistencias iniciales más bajas y desarrollos más lentos a edades avanzadas en comparación con CAAN y CAAR. Comparando el comportamiento de CAARRce y CAARRL, los concretos que contienen residuos cerámicos parecen ser ligeramente más reactivos, ya que ofrecen un crecimiento más sostenido en resistencia, mientras que los residuos de ladrillo, debido a su mayor porosidad y rugosidad, contribuyen más al llenado de vacíos y densificación, pero menos a la resistencia.

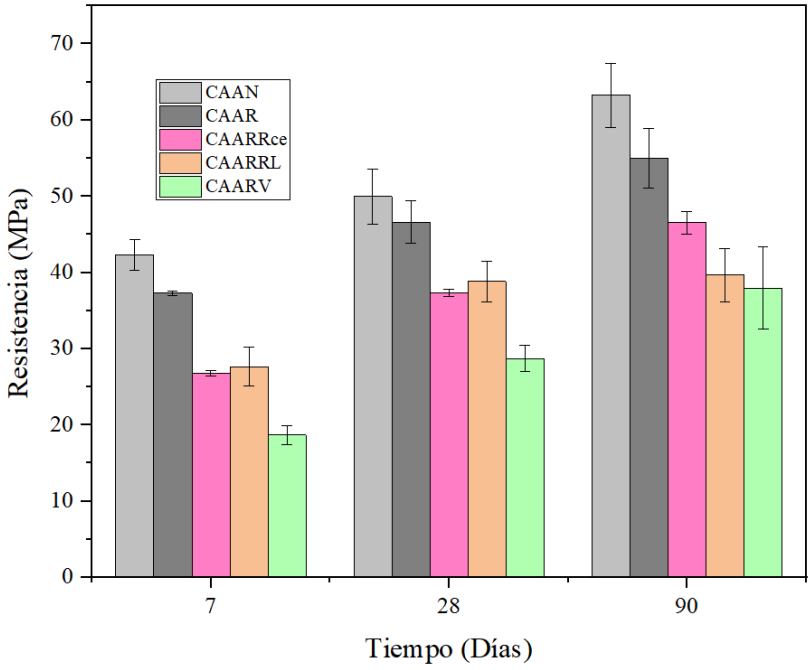


Figura 38: Comparación de resultados de resistencia a la compresión para las Mezclas de concretos.

En cuanto a la mezcla CAARV (vidrio reciclado), a pesar de que su diseño priorizó un acabado arquitectónico más atractivo, que una resistencia estructural, los resultados de la tabla 31 muestran valores de 28,72 MPa a los 28 días y 31,97 MPa a los 90 días, cumpliendo con la resistencia de diseño. El vidrio actúa como un agregado principalmente inerte; sin embargo, a edades tempranas, la fricción adicional entre las partículas de vidrio (gruesas y finas) puede ayudar a una mejor compactación y la reducción de vacíos en la matriz. A largo plazo, si el vidrio contiene partículas muy finas, puede exhibir un leve comportamiento puzolánico, especialmente en ambientes alcalinos, contribuyendo al incremento en resistencia (Ver figura 38). Esto se debe a que el vidrio finamente molido puede reaccionar con el hidróxido de calcio presente en la matriz del cemento, formando compuestos cementantes adicionales que mejoran la resistencia del material (Villarreal Ortega, J. M. 2017). En edades tempranas, los residuos cerámicos, de ladrillo y de vidrio presentan ventajas distintas: los cerámicos aportan reactividad química inicial, los ladrillos ofrecen una mejor

densificación de la matriz, y el vidrio favorece la cohesión y compacidad debido a sus formas angulares y su rigidez (Siddique, R. Kaur, M. 2016). Estas características muestran cómo cada material reciclado contribuye no solo al desarrollo de la resistencia mecánica, sino también a los objetivos de sostenibilidad y diseño arquitectónico.

- Resistencia a la tracción indirecta (ASTM C 496) (NTC 722)

Las resistencias a la tracción indirecta de las mezclas CAAN, CAAR, CAARRce, CAARRL y CAARV se encuentran en un rango de 2.51 MPa a 3.52 MPa tal y como se observa en la figura 39. Todas las mezclas evaluadas se encuentran dentro de este rango aceptable, lo que indica que, a pesar de las variaciones en los materiales utilizados, las mezclas cumplen con los requisitos mínimos de resistencia para aplicaciones arquitectónicas.

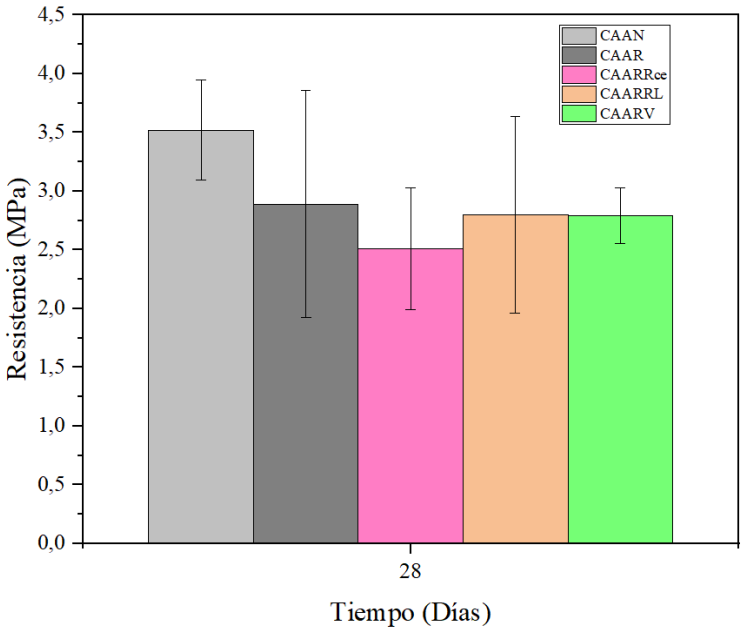


Figura 39: Comparación de resistencias a tracción indirecta para las muestras de concreto.

La mezcla CAARRce, que incorpora residuos de cerámica, presentó una resistencia a la tracción menor en comparación con otras mezclas (Ver figura 39). Esto puede estar relacionado con la distribución de los poros y la microestructura resultante del uso de cerámica triturada. Aunque en la resistencia a la compresión esta mezcla mostró un desarrollo progresivo a lo largo del tiempo, en la tracción indirecta la cohesión entre las partículas recicladas pudo verse afectada, generando una menor capacidad de absorción de esfuerzos de tracción (Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I., 2006). Esto puede estar relacionado a la presencia de su capa esmaltada, la cual genera una baja unión interfacial con la matriz de cemento. Adicionalmente, la menor reactividad disminuiría la formación de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia, afectando la cohesión entre los materiales y el rendimiento del concreto. Además, las características del agregado reciclado, como su porosidad y rugosidad, también pueden influir negativamente en la resistencia (Rojas, AE,

2019). De manera similar, la mezcla CAARRL, que reemplaza un 20% del cemento por polvo de ladrillo, tiene una resistencia de 2,80 MPa. Los ladrillos triturados tienen una alta absorción de agua, lo que puede reducir la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, afectando negativamente la resistencia. Además, los residuos de ladrillo pueden contener impurezas y tener una calidad inferior en comparación con los agregados naturales, lo que también contribuye a una menor resistencia.

La mezcla CAARV, que utiliza vidrio grueso y fino en combinación con residuos de construcción, muestra una resistencia de 2,79 MPa (Ver figura 39). El vidrio fino puede actuar como un relleno efectivo, reduciendo la porosidad y mejorando la densidad del concreto. Por otro lado, el vidrio grueso puede crear puntos de concentración de tensiones si no está bien distribuido, lo que podría afectar negativamente la resistencia (Ramos Raimondi, M. A. 2024). En general, el uso de vidrio en la mezcla CAARV parece mantener una resistencia aceptable dentro del rango establecido por la norma NTC 722, pero es importante considerar cuidadosamente la granulometría y la distribución del vidrio para optimizar las propiedades mecánicas del concreto.

En general, se observa que la muestra de referencia (CAAN), elaborada con agregados naturales, muestra la mayor resistencia a la tracción indirecta (3,52 MPa), lo que destaca su calidad y uniformidad superiores en comparación con las otras mezclas. En contraste, las mezclas con materiales reciclados, aunque ligeramente inferiores, muestran un desempeño adecuado para concreto arquitectónico, con CAAR alcanzando 2.89 MPa. Las mezclas CAARRce y CAARRL, con resistencias de 2,51 y 2,80 MPa, respectivamente, reflejan las limitaciones iniciales de estos materiales, aunque sus propiedades puzolánicas podrían mejorar a largo plazo.

- Densidad, absorción y porosidad (ASTM C 642)

El análisis de las propiedades físicas de las cinco mezclas de concreto revela diferencias significativas (Ver tabla 32), debido al uso de materiales reciclados como vidrio, grava reciclada, residuos de cerámica y ladrillo. La mezcla CAAN, con agregados naturales, presenta la menor absorción de agua (6,11%) y el menor volumen de vacíos (13,97%), lo que indica una estructura más densa y menos porosa. Esto se debe a la menor porosidad y mayor densidad de los agregados naturales (2,54 g/cm³) comparados con los reciclados (2,43 g/cm³), que contienen restos de mortero adherido.

La mezcla CAAR, que utiliza grava reciclada, muestra un aumento en la absorción de agua (8,59%) y el volumen de vacíos (18,22%). Esto se debe a la mayor porosidad y absorción de agua de los agregados reciclados, que tienen una absorción de 5,90% debido a los restos de mortero y otros materiales adheridos. La menor densidad aparente (2,59 g/cm³) también refleja la presencia de estos poros adicionales, lo que afecta negativamente la compactación y la integridad estructural del concreto.

Las mezclas CAARRce y CAARRL, presentan una absorción de agua y volumen de vacíos similares ($\pm$9% y de 18%, respectivamente). La inclusión de estos residuos como reemplazo parcial del cemento contribuye a una mayor porosidad debido a la menor reactividad y mayor absorción de estos materiales. Sin embargo, la densidad aparente ligeramente menor en

CAARRL (2,51 g/cm³) sugiere que el polvo de ladrillo puede tener un efecto menos eficiente comparado con el polvo de cerámica. En el estudio realizado por Castillo y Hernández (2020), se observó que el uso de polvo de ladrillo como reemplazo parcial del cemento resultó en una mayor porosidad y menor densidad aparente, lo que coincide con los resultados obtenidos en esta investigación

Finalmente, la mezcla CAARV, que combina agregados reciclados y vidrio, muestra una absorción de agua intermedia (6,68%) y un volumen de vacíos relativamente bajo (14,43%). El vidrio, tanto grueso como fino, actúa como un relleno efectivo, reduciendo la porosidad y mejorando la densidad del concreto (2,52 g/cm³). Estudios previos han demostrado que el vidrio puede mejorar la durabilidad y resistencia del concreto al reducir la cantidad de vacíos y mejorar la compactación. (Cano Cano, J. D., & Cruz Pulgarín, C. M. 2017)

En resumen, el uso de materiales reciclados como vidrio, grava reciclada, residuos de cerámica y ladrillo en concretos ofrece una alternativa sostenible y eficiente. Estos materiales pueden mejorar ciertas propiedades físicas del concreto, como la reducción de la porosidad y el aumento de la durabilidad.

Tabla 32: *Resultados del ensayo densidad, absorción y porosidad en mezclas de concreto a los 28 días de curado*

Mezclas de croncreto	**Absorción después de Inmersión y Ebullición *(Ae)* (%)**	**Densidad Aparente *(ρ_a)* (g/cm3)**	**Volumen de Vacíos *(V_v)* (%)**
CAAN	6,11 ± 0,16	2,66 ± 0,04	13,97 ± 0,46
CAAR	8,59 ± 0,06	2,59 ± 0,01	18,22 ± 0,01
CAARRce	8,71 ± 0,16	2,57 ± 0,00	18,29 ± 0,23
CAARRL	9,24 ± 0,13	2,51± 0,00	18,84± 0,08
CAARV	6,68± 0,24	2,52± 0,01	14,43± 0,10

.

- Prueba de succión capilar (ASTM C 1585-04)

El análisis de succión capilar realizado bajo la norma ASTM C1585-20 muestra diferencias significativas entre las mezclas debido a las propiedades de los materiales reciclados incorporados (tabla 33, figura 40). Este comportamiento se evalúa a través de dos indicadores principales: absorción inicial (Si) y absorción secundaria (Ss), que reflejan la velocidad con la que el agua es absorbida por el concreto en las primeras etapas y en condiciones estabilizadas, respectivamente.

La mezcla CAAN (mezcla patrón con agregados naturales) presenta la absorción inicial más baja y una absorción secundaria moderada (0,00363 mm/s$^{1/2}$), esto indica una estructura más densa con menor conectividad capilar, atribuida a la menor porosidad y alta compactación

de los agregados naturales. La potencia R cercano a 1 en ambas fases sugiere alta confiabilidad en los datos obtenidos para esta mezcla.

Tabla 33: *Tasa de absorción y coeficiente de correlación lineal correspondientes a los concretos*

Mezcla	Absorción inicial (Si) (mm/s^1/2)	R	Absorción Secundaria (Ss) (mm/s^1/2)	R
CAAN	0,00911	0,99042	0,00363	0,9572
CAAR	0,01507	0,99343	0,00641	0,9713
CAARRce	0,01399	0,99461	0,00464	0,97038
CAARRL	0,01198	0,97766	0,00322	0,96099
CAARV	0,01615	0,98845	0,00799	0,97727

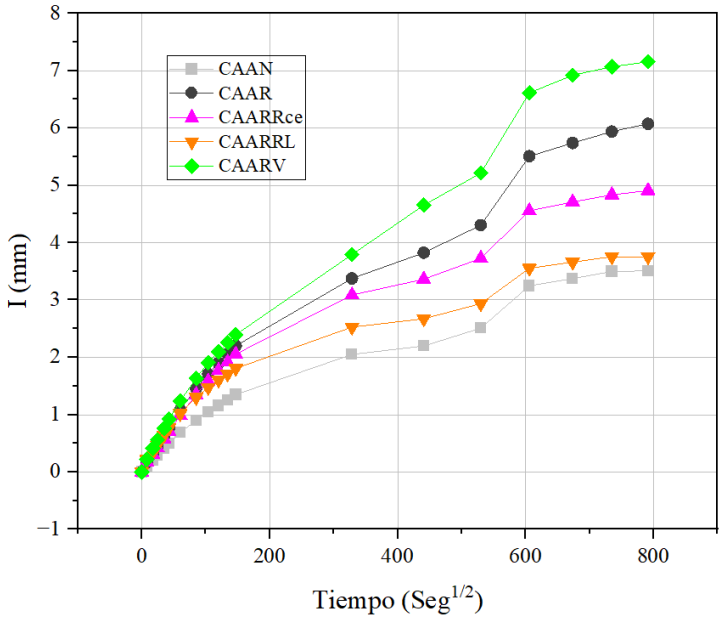


Figura 40: Comparación de Succión capilar para cada mezcla de concreto.

Por otro lado, la mezcla CAAR (que utiliza grava reciclada) muestra un incremento notable en las absorciones inicial (0,01507 mm/s$^{1/2}$) y secundaria (0,00641 mm/s$^{1/2}$). Esto se debe a los restos de mortero adheridos a los agregados reciclados, que incrementan la porosidad y la capilaridad del material, permitiendo una mayor absorción de agua en ambas fases. Sin embargo, el coeficiente de evaluación R alto para esta mezcla indica que el comportamiento del agua absorbida sigue un patrón consistente.

La mezcla CAARV, que incluye vidrio grueso y fino, exhibe la mayor absorción inicial y secundaria reflejando una conectividad capilar más alta. El vidrio, aunque contribuye a la densidad y cohesión del material, no mejora sustancialmente las propiedades de impermeabilidad, debido a su baja interacción química con la matriz del concreto en comparación con materiales puzolánicos. Este resultado demuestra que el vidrio tiene más impacto en el acabado arquitectónico que en la reducción de la permeabilidad.

Por el contrario, las mezclas CAARRce y CAARRL, que incorporan residuos cerámicos y de ladrillo, muestran valores intermedios de absorción inicial y secundaria (Ver figura 40). La mezcla con cerámica (CAARRce) tiene un Si de 0,01399 mm/s$^{1/2}$ mientras que el ladrillo (CAARRL) presenta un valor menor (0,01198 mm/s$^{1/2}$). Esto sugiere que el polvo cerámico mejora parcialmente la densificación de la matriz, mientras que el ladrillo aporta una mayor compactación gracias a sus características granulométricas. Ambos materiales contribuyen a una reducción relativa de la absorción secundaria en comparación con los agregados reciclados, debido a su actividad puzolánica.

6.4. Fase IV: Validación del potencial de aplicación.

Se elaboraron placas tipo muretes, con dimensiones de 30 x 30 x 5 cm, utilizando las mezclas CAAN, CAAR, CAARRce y CAARRL. A partir de cada mezcla se fabricaron dos placas, las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia a la flexión para evaluar su desempeño mecánico. El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle utilizando una máquina de aplicación de carga universal (Ver figura 41) y siguiendo la norma ASTM C293. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 34.



Figura 41: Maquina Universal, en el ensayo a flexión de la placa de la mezcla CAAN.

Tabla 34: *Resultados a flexión de las placas de concreto*

Mezcla	Fuerza (N)	Módulo de Rotura (MPa)
CAAN	10542,15	6,33
CAAR	10689,25	6,41
CAARRce	8825,98	5,30
CAARRL	9610,51	5,76

El análisis de las diferentes mezclas de concreto revela que la incorporación de agregados reciclados puede influir significativamente en la resistencia a la flexión del material. Mientras que la mezcla CAAN, con agregados naturales, exhibe una resistencia elevada (6,33 MPa), la mezcla CAAR, que emplea residuos de construcción reciclados, muestra un rendimiento ligeramente superior (6,41 MPa), lo que sugiere una buena adherencia de estos materiales a la matriz cementicia. Sin embargo, la mezcla CAARRce, con un 20% de sustitución de cemento por residuos de cerámica, presenta la resistencia más baja (5,30 MPa), indicando una menor cohesión en la estructura del concreto. En contraste, la mezcla CAARRL, que emplea residuos de ladrillo en sustitución parcial del cemento, ofrece un desempeño intermedio (5,76 MPa), lo que sugiere que los residuos de ladrillo tienen una mejor compatibilidad con la matriz cementicia que los residuos cerámicos.

A partir de los resultados anteriores se elaboraron tres placas tipo muretes (ver tabla 35), con dimensiones de 30 x 30 x 5 cm, utilizando las mezclas CAAR, CAARRce y CAARRL. Adicionalmente, se fabricó una cenefa con dimensiones de 30 x 30 x 2 cm (ver tabla 36), empleando un mortero en el que se reemplazó el 40 % de la arena por vidrio reciclado fino. Este porcentaje fue seleccionado con base en los resultados obtenidos en las mezclas de microconcretos, donde el 40 % de vidrio demostró un mejor desempeño mecánico y un acabado más uniforme, atribuido a la mayor cantidad de vidrio en la mezcla.

Para la cenefa, se intentó incorporar partículas de vidrio grueso directamente en el molde antes de vaciar la mezcla, con el objetivo de que estas quedaran visibles en la parte superior como un elemento decorativo. Sin embargo, durante el proceso de vaciado, la mezcla absorbió las partículas de vidrio grueso, lo que impidió que se observaran en la superficie una vez desmoldeada.

Las placas de concreto arquitectónico incluidas en la tabla 35 presentan variaciones significativas en resistencia a flexión y acabado, dependiendo de la mezcla utilizada. En las mezclas que reemplazaron un 20 % del cemento por polvos reciclados, se observaron diferencias importantes. La mezcla CAARRL, que utiliza polvo de ladrillo, mostró un módulo de rotura de 5,76 MPa, posicionándose como una opción más robusta en comparación con CAARRce, que incorpora polvo de cerámica y alcanzó solo 5,30 MPa. La pérdida de resistencia en ambas mezclas recicladas se atribuye a la interacción de los polvos reciclados con la matriz cementicia, pero CAARRL logra un mejor balance, lo que la convierte en una alternativa viable para aplicaciones estructurales con una carga moderada.

Por otro lado, los ensayos de coloración basados en el modelo CIELAB, realizados sobre pastas con reemplazo parcial de cemento por polvo de cerámica y ladrillo, ofrecen una base para interpretar el acabado final de las placas. En este contexto, la mezcla de control CAAR se mantiene con tonalidades más neutras y una textura uniforme, representando un acabado tradicional. Por otro lado, las mezclas recicladas generan acabados más cálidos y texturas diferenciadas.

En particular, CAARRL, que utiliza polvo de ladrillo, presentó un color cálido y homogéneo, con tonos rojizos y amarillentos (a y b) más intensos. Esta mezcla también mostró una textura

más uniforme, lo que la hace adecuada para aplicaciones arquitectónicas donde la estética es una prioridad. En contraste, CAARRce, con polvo de cerámica, tuvo una coloración menos uniforme y una textura más irregular, posiblemente debido a la interacción del polvo de cerámica con la matriz de cemento.

Tabla 35: *Aplicaciones finales diseñadas (Placas tipo muretes).*

	
Placa CAAR	
	
Placa CAARRL	Placa CAARRce

La Cenefa de la tabla 36 se desarrolló con un enfoque en la estética arquitectónica, incorporando vidrio reciclado como reemplazo parcial de la arena en un 40 %. En la cara inferior, el vidrio fino quedó expuesto de manera efectiva, logrando un acabado visual atractivo y destacando la sostenibilidad del diseño. Sin embargo, en la cara superior, donde se buscaba resaltar partículas de vidrio grueso, el efecto no fue el esperado debido al peso del microconcreto, que absorbió estas partículas durante el vaciado. Esto indica la necesidad de ajustes técnicos en el diseño de la mezcla o en el molde para lograr una mejor distribución del vidrio grueso y maximizar su visibilidad en la superficie.

Aunque la integración del vidrio grueso necesita mejoras, el uso de vidrio reciclado demostró su potencial para enriquecer el diseño de concreto arquitectónico. Las cenefas reflejan un enfoque innovador hacia la sostenibilidad, siendo ideales para aplicaciones decorativas que no requieren carga estructural.

Tabla 36: *Aplicaciones finales diseñadas (Cenefa).*

	
Cenefa, Cara Superior	Cenefa, Cara Inferior

7. CONCLUSIONES

El desarrollo del concreto arquitectónico con agregados reciclados y pigmentos naturales ha demostrado ser una alternativa viable y sostenible, combinando estética, resistencia y funcionalidad. A lo largo del estudio, se evidencia que la incorporación de residuos de construcción, como vidrio reciclado, cerámica y ladrillo, permite la optimización de propiedades mecánicas y físicas sin comprometer la calidad visual del material. Además, la investigación resaltó la importancia de la dosificación adecuada y el ajuste en la composición de las mezclas para lograr resultados óptimos. La selección de materiales reciclados no solo contribuye a reducir el impacto ambiental, sino que también permite el diseño de concretos con acabados diferenciados y de alta calidad para aplicaciones arquitectónicas.

El análisis de colorimetría y resistencia mecánica permitió determinar que un reemplazo del 20% de cemento por residuos de ladrillo o cerámica es la mejor opción para lograr un equilibrio entre estética y resistencia estructural. Los ensayos mostraron que, a este porcentaje, el concreto alcanzó una coloración homogénea sin variaciones abruptas, evitando la saturación de pigmento que afectaría la uniformidad cromática. En términos de resistencia, la adición de Rce y RL mejoró el desempeño del concreto a largo plazo debido a su reactividad puzolánica, contribuyendo a la formación de productos cementantes adicionales.

Los microconcretos diseñados presentan resistencias significativamente altas, superando las expectativas para un concreto arquitectónico. La mezcla patrón alcanzó 43,27 MPa a los 28 días y 52,57 MPa a los 90 días, mientras que la mezcla con 40% de vidrio fino obtuvo 46,75 MPa y 47,54 MPa en los mismos periodos. Estos resultados confirmaron que la adición de vidrio reciclado no solo mejoró la resistencia mecánica del material, sino que también favoreció un acabado más homogéneo y visualmente atractivo. La incorporación del 40% de vidrio fino resultó ser la mejor alternativa, ya que permitió una distribución más uniforme de las partículas en la mezcla, logrando una mayor compactación y menor porosidad. Además, el contenido elevado de vidrio en la matriz cementicia generó una superficie más reflectante, lo que contribuyó a mejorar la estética del concreto. Estos hallazgos fueron fundamentales para la selección del porcentaje de vidrio en la mezcla de concreto CAARV, garantizando que el material conservará tanto su resistencia como su atractivo visual en aplicaciones arquitectónicas.

Los resultados de resistencia a la compresión de los concretos evidenciaron valores significativamente superiores al diseño inicial de 28 MPa. La mezcla patrón (CAAN) alcanzó 49,95 MPa a los 28 días y 63,27 MPa a los 90 días, mientras que la mezcla con grava reciclada (CAAR) logró 46,62 MPa y 54,99 MPa, respectivamente. Además, los concretos modificados con residuos de cerámica y ladrillo (CAARRce y CAARRL) presentaron texturas cálidas y rugosas que los hacen ideales para aplicaciones arquitectónicas con requerimientos estéticos específicos. La mezcla CAARV, con vidrio reciclado, mostró una textura homogénea y reflectante, posicionándose como la mejor alternativa para acabados superficiales decorativos.

Las aplicaciones finales, como placas tipo muretes y cenefas, confirmarán que el concreto arquitectónico desarrollado es adecuado para múltiples usos decorativos y funcionales. La

mezcla CAARRL, con residuos de ladrillo, presentó un acabado cálido y homogéneo, ideal para aplicaciones arquitectónicas donde la estética es prioritaria. Por otro lado, la mezcla con vidrio reciclado logró una textura brillante y moderna, aunque la distribución del vidrio grueso en la cenefa no fue uniforme debido a la absorción por la matriz cementicia. En general, los elementos producidos mostraron una combinación óptima de resistencia mecánica, durabilidad y estética, consolidando el uso de agregados reciclados como una alternativa viable en la arquitectura sostenible. Si se busca un diseño de concreto arquitectónico con un cambio de color moderado y controlado, la opción de utilizar residuos de cerámica (Rce) podría ser la más adecuada, ya que ofrece una variación cromática menos drástica y puede ser más fácil de integrar en diseños donde la uniformidad del color sea clave. Por otro lado, si se desea un cambio de color más notable y una estética más variada, el residuo de ladrillo (RL) podría ser una mejor opción, especialmente en aplicaciones donde los contrastes de color y la textura visual son importantes para el diseño final.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Acosta, C. (2022, mayo 5). Los altos costos de los insumos amenazan proyectos de vivienda de interés social. La República. Recuperado de https://www.larepublica.co/economia/los-altos-costos-de-los-insumos-amenazan-proyectos-de-vivienda-de-interes-social-3357080.

[2] Novarq. (2021, mayo 18). Pigmentos en el concreto color. Recuperado de https://novarq.com.py/pigmentos-en-el-concreto-color/

[3] Cemex. (2018). Concreto arquitectónico de color integral. Recuperado de https://www.cemexpanama.com/documents/46130145/46412300/ficha-tecnica-concreto-arquitectonico.pdf/5cb9ef2c-818a-f838-e186-c9c668ab481b.

[4] Bernardo Tamayo-García, B. Albareda-Valls, A. Rivera-Rogel, A y Cornado, C. (14 junio 2019). Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate.

[5] Figueroa Rincón, D. (2020). Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos. Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería civil. Tunja, Boyacá

[6] ICOCED Variación y contribución mensual por grupo y subgrupo de costo Total (p. 10). Por DANE. (marzo 2022). tomado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/icoced/bol_icoced_abril2023.

[7] ICONTEC. (2021). NTC 6421:2021, Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico. Obtenido de https://tienda.icontec.org/gp-agregados-gruesos-reciclados-parauso-en-el-concreto-hidraulico-ntc6421-2021.html ICONTEC. (2021). NTC 6422:2021, Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados. Obtenido de https://tienda.icontec.org/gp-ensayo-de-clasificacion-delos-componentes-de-los-agregados-gruesos-reciclados-ntc6422-2021.html

[8] Ruiz López, N. V. (2018). Concreto a partir de residuos de demolición activados alcalinamente con caucho para aplicaciones en pavimentos rígidos. Cali, Colombia.

[9] Mansour, G. Shamsabadi, E.A. Khodabakhshian, A. Sourmeh, F. Brito, J. (2019). Self-compacting architectural concrete production using red mud. Construction and Building Materials, 384(ELSEVIER), 418-427

[10] Guarín Salinas, J, (2012). Posibilidades de diseño con el concreto arquitectónico, utilizando agregado grueso de ladrillo triturado reciclado. [Tesis para el título de Magister en Construcción]. Universidad Nacional de Colombia

[11] Novaexpertos. (26 de Febrero de 2021). Novacasa center. Obtenido de https://www.novacasacenter.com/que-es-el-concreto-arquitectonico/

[12] Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia.

[13] Sánchez De Guzmán, D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero (Bhandar Editores Ltda. (ed.); Tercera ed). Bhandar Editores Ltda

[14] Vallejo Paredes, C. Villota Coral, J. (2023). Desarrollo de paneles aislantes térmicos y acústicos a partir de residuos de construcción y demolición. [Tesis para el título de Ingeniero Civil]. Universidad del Valle.

[15] DANE. (2022). Índice de Costos de la Construcción de Edificaciones (ICOCED). https://www.dane.gov.co/files/operaciones/ICOCED/bol-ICOCED-jul2023.pdf

[16] CEMEX (2023). Arquitectónico. file:///C:/Users/USER/OneDrive%20-%20correounivalle.edu.co/Escritorio/ft-concreto-arquitectonico-20230802.pdf

[17] Pernett, G. A. (2010) La estética de las texturas. Alarife: ISSN 1657-6, págs. 54-67.

[18] Muñoz, L. (2011). Los valores del color aplicado a la reciente arquitectura. España: Universidad de Murcia

[19] Mallol, G., Lorn, D., Boix, J., Uillla, M., Fouar, J., & Arnau, J. M. (2010). Design of new industrial mould filling systems for the manufacture of ceramic tiles using a discrete element framework. Powder Technology, 404. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117446

[20] Bedoya, C. (2003). El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles. Tesis de maestría. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

[21] Novas Cabrera A. (2010), Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de RCD, basado en normativa internacional y en el desarrollo de investigaciones de universidades colombianas. Magister en ingeniería – Estructuras. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia

[22] Agurto Marcelo, P. (2021). Influencia de los porcentajes de aditivos superplastificantes en la consistencia de concretos fluidos en lima 2021. Universidad Privada del Norte. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.

[23] Caicedo Moreno, E. Del Alamo Abanto, J. (2015). Desarrollo de concretos aplicados a la construcción de edificaciones de concreto en Lima. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.

[24] "Uso de vidrio reciclado como agregado fino en materiales a base de cemento" (Environmental Engineering Science, 2011).

[25] Siddique, R., & Klaus, J. (2011). Influence of glass powder on the properties of cement-based materials. *Waste Management, 31*(1), 70-81. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.001

[26] Neville, AM (2011). Propiedades del hormigón (5.ª ed.). Pearson Education Limited.

[27] Silva, RV, de Brito, J., & Dhir, RK (2019). Hormigón sustentable con materiales reciclados. CRC Press.

[28] Nilson, A. (2014). Diseño de estructuras de concreto (14ª ed.). Prentice Hall.

[29] Kraus, M., y Wolter, H. (2020). Reacción álcali-sílice en el hormigón: prevención y mitigación. *JourRevista de Investigación en Hormigón, 40 (4), https://doi.org/10.1016/j.jc .2020.03.0

[30] Mehta, PK, y Monteiro, PJM (2014). Hormigón: microestructura, propiedades y materiales (4.ª ed.). McGraw-Hill Education.

[31] Siddique, R. Kaur, M. (2016). Uso de plástico reciclado en hormigón: una revisión. Recursos, conservación y reciclaje, 107, 128-140. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.009

[32] Rojas, A. E. (2019). Influencia de residuos de cerámica como sustitución porcentual del cemento sobre la resistencia a la compresión del concreto. Universidad Privada del Norte. Recuperado de https://hdl.handle.net/11537/21287.

[33] Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. A., & Zamora Mondragón, J. E. (2022). Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. Universidad César Vallejo. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12692/83963

[34] Ramos Raimondi, M. A. (2024). Efectos de la fibra de vidrio tipo E, en las propiedades mecánicas del concreto con resistencia f´c=210 kg/cm2. Universidad Peruana Los Andes. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12848/8449.

[35] Jahami, A., Khatib, J., & Raydan, R. (2022). Production of low-cost, high-strength concrete with waste glass as fine aggregates replacement. Buildings, 12(12), 2168. https://doi.org/10.3390/buildings12122168

[36] López, A., & Di Sarli, A. R. (2016). El modelo CIELAB, las fórmulas de diferencia de color y el uso de la norma europea EN 12878 en morteros y hormigones coloreados. Revista LEMIT, (6), 41-53.

[37] González, M., & Pérez, L. (2021). Propiedades físicas y mecánicas de residuos de ladrillo y cerámica. Revista de Materiales de Construcción, 50(2), 145-160. https://doi.org/10.1234/rmc.2021.678

[38] Cano, J. D., & Cruz, C. M. (2017). Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón. Universidad Libre. https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17082/ANALISIS%20DE%20MEZCLAS%20DE%20CONCRETO.pdf?sequence=1[1](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17082/ANALISIS%20DE%20MEZCLAS%20DE%20CONCRETO.pdf?sequence=1)

[39] Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. Revista Ingeniería de Construcción RIC, 30(2), 25-35. Recuperado de https://portal.ondac.com/601/w3-article-64864.html

[40] Martínez-Soto, I. E., & Mendoza-Escobedo, C. J. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. Ingeniería Investigación y Tecnología, 7(3), 151-164. Recuperado de http://scielo.unam.mx/pdf//iit/v7n3/v7n3a02.pdf

[41] Villarreal Ortega, J. M. (2017). Evaluación del efecto puzolánico del vidrio de borosilicato finamente molido, en sustitución parcial de cemento portland en morteros. Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado de http://eprints.uanl.mx/16168/

[42] Castillo, M. D., & Hernández, K. A. (2020). Propuesta de concreto de baja permeabilidad con adición de polvo de ladrillo de arcilla para la construcción de viviendas en ambientes marinos. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654635/CastilloG_M.pdf?sequence=3[1](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654635/CastilloG_M.pdf?sequence=3)

[43] Cano Cano, J. D., & Cruz Pulgarín, C. M. (2017). Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón. Universidad Libre Seccional Pereira. Recuperado de https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17082/ANALISIS%20DE%20MEZCLAS%20DE%20CONCRETO.pdf?sequence=1.

[44] 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. Universidad y Sociedad, 14(1), 179-190. Recuperado de SciELO.

[45] Ismail, ZZ y Al-Hashmi, EA (2009). Reciclaje de vidrio de desecho como reemplazo parcial de agregado fino en hormigón. Waste Management, 29 (2), 655-659. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012

[46] Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., y Wang, H. (2005). Características y reactividad puzolánica de polvos de vidrio. Cement and Concrete Research, 35 (5), 987-993. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015

[47] Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2006). Use of selected waste materials in concrete mixes. Waste Management, 27(12), 1870-1876. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026

[48] Viera, P., & Chicaiza, C. (2018). Uso de residuos cerámicos como sustituto del cemento para fabricación de morteros. Ciencia, 20(1), 34-44.

[49] Valencia-Saavedra, W., Robayo Salazar, R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2021). Alkali-activated hybrid cements based on fly ash and construction and demolition wastes using sodium sulfate and sodium carbonate. [https://www.mdpi.com/1420-3049/26/24/7572].

[50] Robayo, R. (2020). Result Analysis Report - Mastersizer 2000. Universidad del Valle, EIMAT-GMC.

[51] Martínez Gutiérrez, F. (2022). Desarrollo de un bloque de uso estructural y baja conductividad térmica a partir de un concreto geopolimérico híbrido basado en cenizas volantes [Trabajo de grado, Universidad del Valle].

[52] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). Guía para el manejo de los residuos de construcción y demolición (RCD). Bogotá, Colombia.