

**Evaluación de la durabilidad en ácido acético y sulfato de magnesio de morteros elaborados a partir de activación alcalina de ceniza volante, ladrillo y vidrio reciclado**

Estudiantes:

Hassan Ali Saleg Legarda

Juan Diego Portilla Rivera

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO CIVIL



Universidad del Valle  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática 3747 - Sede Cali  
Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2025

**Evaluación de la durabilidad en ácido acético y sulfato de magnesio de morteros elaborados a partir de activación alcalina de ceniza volante, ladrillo y vidrio reciclado**

Estudiantes:

Hassan Ali Saleg Legarda

Juan Diego Portilla Rivera

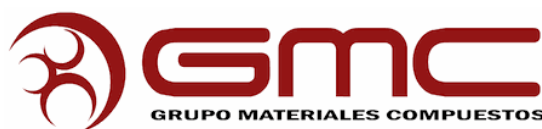
Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO CIVIL

Directora:

Ing. Mónica A. Villaquirán Caicedo, PhD.

Codirectora:

Qca. Ruby Mejía de Gutiérrez, PhD.



Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática 3747 - Sede Cali

Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestro especial agradecimiento a la Universidad del Valle, por habernos proporcionado las herramientas necesarias para formarnos de manera integral y avanzar firmemente en el camino profesional que hemos elegido.

Agradecemos a nuestra directora, la Ing. Mónica A. Villaquirán Caicedo, Ph.D., y a nuestra codirectora, la Dra. Ruby Mejía de Gutiérrez, M.Sc., Ph.D., por su constante apoyo, acompañamiento y orientación a lo largo de este proceso investigativo. Sus exigencias académicas y guía experta hicieron posible la culminación exitosa de este trabajo de grado.

Reconocemos también al Ing. Nicolás Ocampo, por facilitarnos el aprendizaje práctico en el laboratorio, brindándonos siempre su apoyo y disposición.

Nuestro agradecimiento también a la laboratorista July Manquillo, por su colaboración técnica y guía durante la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, nos motivaron y contribuyeron con su apoyo incondicional para seguir adelante en esta investigación

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN                                                                          | 1  |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN                                            | 3  |
| 2.1 Descripción del problema                                                             | 3  |
| 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 Activación alcalina y/o geopolimerización                                          | 6  |
| 4.1.2 Ceniza volante                                                                     | 6  |
| 4.1.3 Vidrio                                                                             | 8  |
| 4.1.4 Residuo de ladrillo                                                                | 8  |
| 4.1.5 Morteros                                                                           | 8  |
| 4.1.5.1 Propiedades de morteros en estado fresco                                         | 8  |
| 4.1.5.2 Propiedades del mortero en estado endurecido                                     | 9  |
| 4.2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE                                                       | 12 |
| 4.2.1 Utilizando ceniza volante en la fabricación de geopolímeros                        | 12 |
| 4.2.2 Utilizando residuos de ladrillo en la fabricación de geopolímeros                  | 12 |
| 4.2.3 Utilizando residuos de vidrio en la fabricación de geopolímeros                    | 13 |
| 4.2.4 Sobre la durabilidad de geopolímeros en diferentes ambientes                       | 14 |
| 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL                                                              | 16 |
| 5.1 Fase 1: Selección, adecuación y caracterización de materias primas                   | 16 |
| 5.1.1 Materias primas                                                                    | 16 |
| 5.1.2 Activadores alcalinos                                                              | 17 |
| 5.1.3 Agregado fino                                                                      | 17 |
| 5.2 Fase 2: Diseño y preparación de las mezclas (pastas)                                 | 18 |
| 5.2.1 Caracterización de las pastas                                                      | 20 |
| 5.3 Fase 3: Diseño y caracterización físico-mecánica de los morteros                     | 21 |
| 5.3.1 Caracterización en estado fresco                                                   | 22 |
| 5.3.2 Caracterización en estado endurecido                                               | 23 |
| 5.3.3 Evaluación de la durabilidad de morteros en ambientes agresivos (ácido y sulfatos) | 24 |
| 5.3.4 Evaluación del desempeño de morteros a alta temperatura                            | 25 |
| 5.4 Fase 4: Validación del potencial de aplicación                                       | 26 |
| 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS                                                                 | 27 |
| 6.1 Fase 1: Selección, adecuación y caracterización de materias primas y activadores     | 27 |
| 6.1.1 Materias primas                                                                    | 27 |
| 6.1.2 Agregado fino                                                                      | 27 |
| 6.2 Fase 2: Caracterización de pastas                                                    | 29 |
| 6.2.1 Tiempo de fraguado de pastas                                                       | 29 |
| 6.2.2 Densidad, absorción y porosidad de pastas                                          | 30 |
| 6.2.3 Resistencia a compresión                                                           | 31 |
| 6.3 Fase 3: Caracterización de los morteros                                              | 32 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.1 Ensayo de fluidez de los morteros                                                | 32 |
| 6.3.2 Densidad, absorción y porosidad                                                  | 33 |
| 6.3.3 Resistencia a compresión de morteros                                             | 34 |
| 6.3.4 Succión capilar de los morteros                                                  | 35 |
| 6.3.5 Durabilidad de morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) | 37 |
| 6.3.6 Durabilidad de morteros sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ )    | 41 |
| 6.4 Evaluación térmica de morteros a alta temperatura                                  | 48 |
| 6.4.1 Resistencia mecánica después de exposición en horno a $800^\circ\text{C}$        | 48 |
| 6.5 Fase 4: Validación del potencial de aplicación                                     | 50 |
| 6.5.1 Prototipo de elementos de enchape                                                | 50 |
| 7. CONCLUSIONES                                                                        | 52 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS                                                          | 54 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema general de la metodología experimental de la investigación.                                                                                                                                    | 16 |
| Figura 2. Materias primas. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                                          | 17 |
| Figura 3. Activadores alcalinos. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                                    | 17 |
| Figura 4. Agregados finos. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                                          | 18 |
| Figura 5. (izq) Pasta de cemento vaciada en molde y (der) cubos desencofrados. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                      | 19 |
| Figura 6. Montaje de ensayo de Vicat. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                               | 20 |
| Figura 7. Montaje del ensayo densidad, porosidad y absorción de las pastas. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                         | 21 |
| Figura 8. Morteros encofrados en moldes cúbicos (Fuente: Elaboración propia).                                                                                                                                    | 21 |
| Figura 9. Ensayo de fluidez en mesa de flujo. (Fuente: Elaboración propia) .                                                                                                                                     | 22 |
| Figura 10. Montaje del ensayo densidad, porosidad y absorción de morteros. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                          | 23 |
| Figura 11. Montaje de ensayo para resistencia a la compresión de morteros. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                          | 24 |
| Figura 12. Ensayos de flexión en vigas. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                             | 24 |
| Figura 13. Muestra de vigas y marcas para medición de expansión. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                    | 25 |
| Figura 14. Probetas organizadas dentro del horno para ensayo térmico a 800°. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                        | 26 |
| Figura 15. Distribución granulométrica para arenas de río y arena de vidrio.                                                                                                                                     | 29 |
| Figura 16. Resultados del ensayo de Vicat.                                                                                                                                                                       | 30 |
| Figura 17. Propiedades físicas de pastas: a) absorción después de inmersión, b) densidad global seca, c) densidad aparente, d) volumen de vacíos.                                                                | 31 |
| Figura 18. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de pastas.                                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 19. Resultados del ensayo de densidad, absorción y porosidad de morteros de arena de río y vidrio a) absorción después de inmersión, b) densidad global seca, c) densidad aparente, d) volumen de vacíos. | 34 |
| Figura 20. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de curado para los morteros.                                                                                                                               | 35 |
| Figura 21. Curva ensayo de succión capilar en morteros absorción vs tiempo.                                                                                                                                      | 36 |
| Figura 22. Resultados de variación de peso de los morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).                                                                                             | 37 |
| Figura 23. Resistencia a compresión residual para edad de 0, 28, 90 y 120 días para morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).                                                           | 38 |
| Figura 24. Apariencia de morteros con arena de río expuestos en ácido acético durante 28 y 120 días. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                | 40 |
| Figura 25. Apariencia de morteros con arena de vidrio expuestos en ácido acético durante 28 y 120 días. (Fuente: Elaboración propia)                                                                             | 41 |
| Figura 26. Resultados de pérdida de peso de morteros de arena de río y vidrio sumergidas en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).                                                                             | 42 |
| Figura 27. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de morteros sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).                                                                                         | 43 |
| Figura 28. Muestra de residuos en envase plástico. (Fuente: Elaboración propia)                                                                                                                                  | 44 |
| Figura 29. Apariencia de morteros con arena de río expuestos en sulfato de magnesio durante 28 y 120 días. (Fuente: Elaboración propia)                                                                          | 46 |
| Figura 30. Apariencia de morteros con arena de vidrio expuestos en sulfato de magnesio durante 28 y 120 días. (Fuente: Elaboración propia)                                                                       | 47 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31. Resultados de expansión de vigas de arena de río y vidrio a 28, 90 y 120 días de exposición a sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ). | 48 |
| Figura 32. Muestra de expansión en vigas y toma de medidas. (Fuente: Elaboración propia)                                                          | 48 |
| Figura 33. Morteros OPC+AA+CV antes y después de exponerse a 800 °C. (Fuente: Elaboración propia)                                                 | 49 |
| Figura 34. Resistencia a compresión de morteros después de exposición en horno a 800°C.                                                           | 50 |
| Figura 35. Prototipo de fachaletas con diferentes mezclas. (Fuente: Elaboración propia)                                                           | 50 |
| Figura 36. Ensayos de flexión para vigas de arena de vidrio utilizados en la elaboración de fachaletas.                                           | 51 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Clasificación de ceniza volante de acuerdo a sus características químicas y físicas. (Fuente: ASTM C618-23)           | 7  |
| Tabla 2. Fluidéz recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación. Fuente: Guzmán, 2001. | 9  |
| Tabla 3. Morteros según la clasificación de la norma NTC 3329.                                                                 | 10 |
| Tabla 4. Dosificación de las pastas.                                                                                           | 20 |
| Tabla 5. Dosificación de las mezclas con arenas.                                                                               | 22 |
| Tabla 6. Caracterización de materias primas. (Fuente: Henao Ríos et al., 2023)                                                 | 27 |
| Tabla 7. Caracterización de los agregados finos.                                                                               | 28 |
| Tabla 8. Resultados del ensayo de fluidéz de las mezclas de morteros.                                                          | 33 |
| Tabla 9. Resultados del ensayo de succión capilar.                                                                             | 36 |

## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la durabilidad de morteros ecológicos elaborados con arena de río y arena de vidrio frente a ambientes agresivos de ácido acético y sulfato de magnesio. Para ello, previamente, se realizó la caracterización química y física de las materias primas empleadas (OPC, ceniza volante, residuo de ladrillo y residuos de vidrio) para determinar su calidad. Se prepararon seis mezclas, cuatro basadas en cemento portland: OPC, OPC + CV, OPC + RL, OPC + VIDRIO, y dos activadas alcalinamente OPC+AA+CV y OPC+AA+RL variando las proporciones de cada componente, permitiendo seleccionar la composición óptima en función de la resistencia a compresión. Posteriormente, se realizaron morteros empleando arena natural y arena de vidrio, a los cuales se les realizó pruebas de fluidez, densidad, porosidad y succión capilar y resistencia a la compresión. Finalmente, los morteros fueron expuestos a ambientes agresivos: ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ). Estos ambientes de exposición permitieron simular condiciones propias de ambientes domésticos para materiales de enchape, el cual fue el elemento de aplicación del presente proyecto.

En el ensayo de fluidez, la mezcla OPC+RL mostró mayor fluidez con arena natural (182.3%), mientras que OPC+AA+RL fue la menos fluida (173.1%). Los resultados de absorción y porosidad mostraron que las mezclas con arena de vidrio absorben ligeramente menos agua comparado a morteros elaborados con arena de río. Al comparar los residuos empleados, los morteros elaborados con RL fueron los morteros que tuvieron la menor absorción, tanto el basado en OPC (11.8%) como el álcali activado (11%), en comparación al mortero de referencia que tuvo una absorción de 14%. En los ensayos de compresión, de manera general los morteros elaborados con arena de vidrio tuvieron menor resistencia cuando eran basados en OPC, mientras que en los morteros álcali activados la resistencia fue mayor frente a morteros de arena de río. Con arena de río, los morteros OPC, OPC+CV, OPC+RL y OPC+VIDRIO alcanzaron entre 17 y 26 MPa a los 28 días, mientras que los activados alcalinamente no superaron los 10 MPa. Con arena de vidrio, los morteros OPC, OPC+CV, OPC+RL y OPC+VIDRIO alcanzaron entre 15 y 24 MPa a los 28 días, y los activados alcalinamente alcanzaron 10 MPa.

La durabilidad de los morteros en ácido acético mostró que los morteros ganan peso durante los primeros días de exposición (entre 1.1-1.5%), sin embargo, cuando avanza la edad pierden peso, hasta un 0.2% cuando se elaboran con arena de río. En los morteros con arena de vidrio, los primeros días ganan entre 0.1-0.6% de peso, y en la medida que avanza el tiempo pierden entre 0.9 y 2.3%. Esta variación de peso afecta la resistencia de los morteros, y después de 90 días las resistencias caen ligeramente para los morteros con arena de río; sin embargo, en morteros con arena de vidrio las resistencias se aumentan para los basados con OPC, y en los álcali-activados permanecen similares que antes del ensayo.

La durabilidad de los morteros en sulfato de magnesio mostró que los morteros ganan peso durante todos los días de exposición entre 1 y 4.5% para los morteros con arena de río (para 120 días de exposición) y entre 1 y 7% para los morteros con arena de vidrio. Esta variación de peso afecta la resistencia de los morteros ya que por la formación de geles debilitan la matriz, y después de 90 días los morteros OPC, OPC+CV, OPC+RL, OPC+VIDRIO las resistencias caen ligeramente para los morteros con arena de río en cambio para los 120 días los morteros activados alcalinamente OPC+AA+CV Y OPC+AA+RL aumentaron. En los morteros con arena de vidrio las resistencias se aumentan desde 90 días de exposición para los morteros basados en OPC, y en los álcali-activados permanecen, en general, similares que al inicio

La durabilidad por exposición a alta temperatura mostró que luego de la exposición a 800 °C, las mezclas con arena de río mostraron mayor resistencia que las de arena de vidrio, la mezcla de referencia OPC alcanzó resistencia de 12.95 MPa y las mezclas con residuos tuvieron una mejor resistencia (entre 5 y 7 MPa); sin embargo, se destaca el mortero álcali-activado con CV que aumentó la resistencia posterior a la exposición a alta temperatura pasando de 4 MPa a 16 MPa. Esto se atribuye a la mayor estabilidad térmica de la arena de río y a las discontinuidades que generan los álcalis del vidrio a altas temperaturas. En los morteros con arena de vidrio, los basados en OPC reportaron resistencias entre 5-8 MPa, mientras que el álcali-activado no superó 3 MPa. En general, los resultados muestran que es posible producir morteros más durables y sostenibles usando residuos, sin embargo, deben cuidarse cuidadosamente las dosificaciones de las materias primas para obtener un material de buena calidad.

Palabras claves: *Durabilidad, Activación alcalina, Ceniza volante, Vidrio reciclado, Residuo de ladrillo, Ácido.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento de la población, la industria de la construcción está obligada a construir nuevas edificaciones, lo cual conlleva a un aumento mayor en la explotación de recursos naturales. Es sabido que la producción de 1 tonelada de cemento portland demanda grandes cantidades de recursos naturales como piedra caliza, arena silíceo, arcilla y agua, y además genera entre 0,82 y 1 tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmósfera. Se estima que, en 2024, la industria del cemento aportó 3.800 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, lo que representa el 8% del total de las emisiones resultantes de actividades humanas (World Economic Forum, 2024). Para mitigar este impacto, la industria cementera se ha propuesto el reemplazo parcial del cemento Portland ordinario (OPC) al incorporar, en general, materiales cementantes suplementarios (MCS), sin embargo, también han surgido otros materiales de construcción alternativos como los denominados de activación alcalina y geopolímeros.

Estos cementantes de activación alcalina, además de la materia prima o precursor de tipo aluminosilicato, requieren el empleo de activadores alcalinos, como el silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) y el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), este tipo de cementantes han adquirido relevancia en las últimas décadas debido a su potencial para reducir la huella de carbono en la industria de la construcción (Tushar et al., 2025). La activación de precursores ricos en sílice y aluminio, y exentos de calcio, conduce a la formación de enlaces químicos tridimensionales en una matriz geopolimérica (Provis & Van Deventer, 2014) con propiedades mecánicas y de durabilidad sobresalientes. El silicato de sodio, conocido como "vidrio soluble", es uno de los activadores más utilizado como fuente de álcali en la tecnología de geopolímeros. Su capacidad para proporcionar iones alcalinos y sílice soluble al sistema de reacción es esencial para la formación de las redes poliméricas estables. Además, se combina a menudo con el hidróxido de sodio para ajustar la alcalinidad y la relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de la solución activadora (Kwek et al., 2021). Debido a esto, estos cementantes son considerados una alternativa sostenible y avanzada en diversas aplicaciones, desde la construcción de infraestructura sostenible hasta materiales de construcción de alto rendimiento.

Como materias primas o precursores en procesos de activación alcalina se pueden emplear residuos y/o subproductos industriales, al igual que las adiciones puzolánicas o MCS, que son empleadas como reemplazo de OPC. En el presente proyecto se emplearon cenizas volantes, residuos de ladrillo y residuos de vidrio. La ceniza volante es un residuo generado en centrales termoeléctricas y en calderas de diferentes industrias; está compuesto por partículas finas que se capturan mediante precipitadores electrostáticos (ESP) o filtros mecánicos como mangas filtrantes (Strand et al., 2002).

El residuo de ladrillo es generado en plantas de producción de ladrillo, así como parte de los residuos de demolición y construcción; este está siendo considerado como un material alternativo en diversas aplicaciones y en especial en la fabricación de materiales de construcción sostenibles (Parra et al., 2024). En cuanto al residuo de vidrio, actualmente en Colombia se tiene una gran demanda de vidrio plano y vidrio de envases, y, en general, su proceso de reciclaje se considera bajo, y por su composición química (elevado contenido de sílice, sodio e incluso calcio) así como su carácter amorfo puede ser una materia prima en procesos de activación alcalina no solo como precursor, sino como activador y/o agregado. (Henao Ríos, et al., 2023).

Considerando lo anterior, este trabajo de grado tuvo como objetivo principal evaluar la durabilidad frente a ácido acético y sulfato de magnesio de un mortero ecológico álcali-activado elaborado a partir de ceniza volante, residuos de ladrillo y arena reciclada proveniente de la trituración de vidrio como

reemplazo parcial de arena natural. Este estudio se desarrolló en el Grupo de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1 Descripción del problema

El crecimiento poblacional y modernización de la sociedad demanda un aumento de los procesos constructivos convirtiendo al sector de la construcción en uno de los sectores más importantes y estratégicos para el desarrollo socioeconómico (Giang & Pheng, 2011). Debido a este desarrollo, se estima un agotamiento de los recursos naturales que va de la mano con la expansión causando un daño directo al medio ambiente y la sociedad. La industria de la construcción es responsable del 23% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, principalmente debido al uso de materiales como el cemento, que requiere altas temperaturas para su producción y es responsable de aproximadamente el 7-8% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> (World Economic Forum, 2024).

En general, los morteros de cemento Portland son materiales ampliamente utilizados en la industria de la construcción, con aplicaciones destacadas que incluyen la unión de materiales, el revestimiento de superficies, las labores de reparación y restauración, así como la impermeabilización de estructuras, entre otros usos. Esta mezcla se compone principalmente de cemento, arena y agua. Sin embargo, el cemento Portland, uno de los tipos más comunes de cemento utilizado en la construcción, tiene una alta huella de carbono asociada a la extracción de los materiales necesarios para su producción, altas temperaturas de producción (aproximadamente 1450 °C), y el uso de combustibles fósiles para los hornos.

En respuesta a la creciente preocupación por el impacto ambiental negativo en el sector de la construcción, la búsqueda de cementantes alternativos al OPC se ha convertido en una tendencia mundial. Entre estos cementantes alternativos los cementos adicionados con ceniza volante, el vidrio reciclado y el residuo de ladrillo, son materiales que están en estudio y son reconocidos por sus propiedades beneficiosas en la producción de cementos no convencionales. La ceniza volante presenta propiedades puzolánicas que mejoran la durabilidad y resistencia del concreto (Mohsen et al., 2023). Con respecto al vidrio reciclado, al ser triturado y utilizado como agregado fino o grueso en el concreto, no solo promueve la reducción de residuos, sino que también se ha encontrado que puede mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del material final (Tariq et al., 2020). Por otro lado, el residuo de ladrillo es un material que ha ganado interés en la industria de la construcción debido a su potencial para ser utilizado como suplemento en la producción de cementos no convencionales. Las propiedades del residuo de ladrillo incluyen su capacidad para mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad del cemento (Özlem Sallı Bideci et al., 2024).

La ceniza volante es un subproducto de la combustión de carbón en centrales térmicas que, si no se trata adecuadamente, puede tener efectos negativos en el medio ambiente y en la salud humana (Saidu et al., 2023). Las termoeléctricas más importantes de Colombia (Termozipa, Termopaipa y Termosochagota) generan alrededor de 600 KTon/año de ceniza volante de calidad variable (Mejía et al., 2014) y en su gran mayoría este subproducto no se está aprovechando debidamente y se constituye en un problema ambiental.

Otro de los materiales que se acumula en grandes cantidades en los vertederos es el vidrio, el cual presenta la desventaja de tardar muchos años en degradarse. A pesar de ser un material altamente reciclable sin límite en el número de veces que puede reutilizarse y sin perder sus propiedades durante el proceso, además de permitir un importante ahorro energético, su tasa de reciclaje no supera el 30%.

Es importante destacar que, por cada tonelada de vidrio reciclado para la fabricación de nuevo vidrio, se evita el consumo de 1,2 toneladas de materia prima virgen y se previene la emisión de más de media tonelada de Gases Efecto Invernadero (GEI). El Informe de Sostenibilidad 2023 de Constructora Bolívar menciona que en el periodo 2022-2023 tan sólo se reciclaron 0,27 Ton de este material (Constructora Bolívar, 2023) frente a las 14.101 Ton generadas en Colombia reportadas por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2023), esto demuestra la poca reciclabilidad de este residuo en el sector de la construcción.

En cuanto a los residuos de ladrillo, se ha experimentado un notable incremento en su generación en los últimos años, debido al crecimiento urbano y expansión de la industria de la construcción de las principales ciudades de Colombia como Bogotá, Cali y Medellín. Este aumento en las cantidades generadas plantea desafíos significativos en cuanto a la gestión adecuada de estos materiales utilizados en obras, dado que una parte considerable de estos residuos termina en vertederos o áreas no autorizadas, las cuales representan consecuencias ambientales negativas. No obstante, diversas iniciativas, como el reciclaje y la reutilización de los residuos de ladrillo en nuevos proyectos de construcción, están siendo promovidas como alternativas sostenibles para mitigar el impacto ambiental y promover la economía circular, ejemplo de ello es el aprovechamiento que viene desarrollando Constructora Bolívar, quienes en el año 2022 reciclaron 156 Ton de residuos de ladrillo en sus obras (Constructora Bolívar, 2023).

Es así como con este contexto general, se hace necesario buscar alternativas más sostenibles y responsables con el medio ambiente, desarrollar materiales de construcción que permitan lograr una disminución del consumo de energía y racionalizar el uso de los recursos naturales, sin afectar sus propiedades, duración, resistencia, etc. Por esta razón, en este proyecto de grado se implementó el uso de materiales residuales para la elaboración de morteros ecológicos activados alcalinamente.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar la durabilidad frente a ácido acético y sulfato de magnesio de un mortero ecológico elaborado a partir de ceniza volante y de residuos de ladrillo con partículas de arena de vidrio reciclado.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar química y físicamente las materias primas: ceniza volante, residuos de ladrillo y vidrio
- Diseñar, producir y caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas (pastas y morteros convencionales y álcali activados)
- Evaluar la durabilidad del mortero diseñado en presencia de ácido acético y sulfato de magnesio
- Proponer con el mortero ecológico optimizado la elaboración de elementos de enchape.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1 MARCO TEÓRICO

#### 4.1.1 Activación alcalina y/o geopolimerización

Los materiales activados alcalinamente son el producto de la reacción que hay entre una fuente de aluminosilicatos, generalmente subproductos industriales como escorias siderúrgicas, residuos de la industria de producción del acero, cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en las plantas termoeléctricas y calderas industriales, entre otros, y un activador acuoso que suministra constituyentes alcalinos, generalmente hidróxidos de metal alcalino, silicatos, carbonatos o sulfatos en una solución con alto pH (Deventer et al., 2014)(M. Torres-Carrasco & F. Puertas, 2017). Los materiales activados alcalinamente pueden clasificarse en dos grupos: (i) en sistemas con alto contenido de calcio (Ca) como los basados en escoria de horno alto activada alcalinamente, donde el producto de reacción principal es un gel de tipo aluminosilicatos de calcio hidratado (C-A-S-H) con estructura bidimensional; y en (ii) sistemas de bajo contenido de Ca, como, por ejemplo, los basados en cenizas volantes activadas alcalinamente, donde el producto de reacción es un gel de tipo aluminosilicatos alcalino hidratado (N-A-S-H) con una estructura tridimensional (David et al., 2014).

La geopolimerización es el término utilizado para hacer referencia a la reacción química que se produce al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos como hidróxidos o silicatos alcalinos, en sistemas de bajo contenido de calcio (Davidovits, J. (2015). El término geopolímeros fue instaurado por el científico Joseph Davidovits en la década de 1970 en sus estudios con metacaolín como materia prima.

Los materiales activados alcalinamente presentan características sobresalientes en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia al fuego y resistencia a agentes corrosivos; los geopolímeros pueden presentar propiedades similares o incluso superiores a las del concreto convencional en términos de resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión (Provis & van Deventer, 2014). También se consideran atractivos para la solidificación y estabilización de residuos, incluidos los residuos radiactivos debido a su alta resistencia química. Numerosos estudios sobre la solidificación de residuos que contienen metales pesados están disponibles en la literatura, por ejemplo, en materiales activados alcalinamente donde se utilizó una escoria de horno alto y se inmovilizó el 99.9% de  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y 98.8% de  $\text{Cr}^{6+}$  en un ensayo de lixiviación (J. Deja Cem et al., 2002).

Además, los geopolímeros han sido reconocidos por su potencial sostenible, ya que su producción puede implicar el uso de materiales reciclados o subproductos industriales y se realiza a baja temperatura cercana al ambiente, lo cual podría reducir significativamente las emisiones de carbono asociadas con la fabricación de materiales de construcción (Wang et al., 2020).

#### 4.1.2 Ceniza volante

Las cenizas volantes son residuos de la combustión del carbón, al igual que se pueden obtener de materiales como, madera, incineración de residuos urbanos y de procesos de fundición, termoeléctricas, y otros sectores industriales, que utilizan como fuente principal para generar energía el carbón (Laverde, 2007).

La normativa americana ASTM C618-23 / NTC 3493 (ASTM C150, 2012) (Coal Fly ash and Rawor Calced Natural Pozzolan for use in Concrete) clasifica la ceniza volante de acuerdo a sus características químicas y físicas, tal como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de ceniza volante de acuerdo a sus características químicas y físicas. (Fuente: ASTM C618-23)

| Requisitos Químicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                    |                 |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Clase              |                 |                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | N                  | F               | C               |
| <b>Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) + óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mín. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 70.0               | 50.0            | 50.0            |
| <b>Óxido de calcio (CaO), %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | reportar solamente | 18.0 máx.       | >18.0           |
| <b>Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), máx. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 4.0                | 5.0             | 5.0             |
| <b>Contenido de humedad, máx. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3.0                | 3.0             | 3.0             |
| <b>Pérdida por ignición, máx. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10.0               | 6.0*            | 6.0             |
| *Se permite el uso de ceniza volante Clase F con hasta 12.0 % de pérdida por ignición si el usuario lo aprueba, ya sea por registros de desempeño o resultados de laboratorio.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |                 |                 |
| Requisitos Físicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                    |                 |                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Clase              |                 |                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | N                  | F               | C               |
| <b>Finura:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |                 |                 |
| <b>Cantidad retenida en tamiz 45 µm (No. 325), máx. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 34                 | 34              | 34              |
| <b>Retenido en 150 µm (No. 100), máx. % <sup>A</sup></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                    | 10 <sup>+</sup> | 10 <sup>+</sup> |
| <b>Índice de actividad resistente <sup>B</sup></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                    |                 |                 |
| <b>Con cemento portland a 7 días, mín. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 75 <sup>c</sup>    | 75 <sup>c</sup> | 75 <sup>c</sup> |
| <b>Con cemento portland a 28 días, mín. %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 75 <sup>c</sup>    | 75 <sup>c</sup> | 75 <sup>c</sup> |
| <b>Requerimiento de agua, máx. % respecto al control</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 115                | 105             | 105             |
| <b>Requisitos de uniformidad:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    |                 |                 |
| <b>Densidad, máxima variación sobre el promedio %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 5                  | 5               | 5               |
| <b>Porcentaje retenido en 45 µm, % máx.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5                  | 5               | 5               |
| <sup>A</sup> El límite solo aplica a ceniza volante que ha sido recolectada o que contiene ceniza de fondo. Determine la cantidad retenida de acuerdo con el Método de Ensayo C136/C136M utilizando un tamaño de muestra de 15 g ± 5 g.<br><sup>B</sup> El índice de actividad puzolánica con cemento portland no debe considerarse como una medida de la resistencia a compresión del concreto que contiene la ceniza volante o la puzolana natural. La masa de ceniza volante o puzolana natural especificada para el ensayo para determinar el índice de actividad puzolánica con cemento portland no se considera como la proporción recomendada para el concreto a utilizarse en la obra. La cantidad óptima de ceniza volante o puzolana natural para un proyecto específico está determinada por las propiedades requeridas del concreto y otros componentes, y debe establecerse mediante ensayos. El índice de actividad puzolánica con cemento portland es una medida de la reactividad con un cemento dado y está sujeta a variación dependiendo de la fuente tanto de la ceniza volante o puzolana natural como del cemento.<br><sup>C</sup> Cumplir con el índice de actividad puzolánica a 7 o 28 días indicará conformidad con la especificación. |                    |                 |                 |

### **4.1.3 Vidrio**

El vidrio es un material inorgánico, duro pero frágil, que puede ser transparente o presentar una variedad de colores dependiendo de su composición química. Se fabrica principalmente a partir de la fusión de arena silíceo, carbonato de sodio y caliza a altas temperaturas, aproximadamente entre 1.400 y 1.500°C, durante un tiempo que puede variar entre 24 y 48 horas. Este proceso permite que los granos de arena se fundan completamente para formar una masa vítrea homogénea que al enfriarse adquiere las propiedades características del vidrio, como su dureza, transparencia y resistencia química (Rawson, 1997).

Actualmente los residuos sólidos (entre ellos se encuentra el vidrio) en Colombia son generados en un 15% por la industria y el comercio, y el otro 85% es generado en los hogares, pero donde más se recicla es a través de los convenios entre industrias y empresas, ya que de los residuos generados por uso doméstico solo es reciclado un 20% de ellos; este reciclaje se da a través de los recicladores o recuperadores informales, que lo realizan de manera callejera (Arroyave, A., 2014). Sin embargo, en la actualidad el pago por reciclaje de vidrio es muy reducido, en razón de lo cual generalmente este va a parar a vertederos.

### **4.1.4 Residuo de ladrillo**

El aprovechamiento de estos residuos constituye un aspecto importante a nivel mundial, ya que representa un beneficio económico por la incorporación de materiales de desecho al proceso productivo de materiales de la construcción y a su vez ayuda a la preservación de los recursos naturales. Es por ello, que el hecho de utilizar los residuos de la industria ladrillera y/o proveniente de residuos de construcción y demolición, minimiza el empleo de recursos no renovables, donde los agregados constituyen entre el 60 y 75 % en peso de un material estructural, y que debido a su escasez cada vez más progresiva, motiva a buscar alternativas en medio de la demanda constante del concreto en los últimos años, de acuerdo al crecimiento del sector de la construcción (Gallón Martínez et al., 2018).

### **4.1.5 Morteros**

Los morteros están constituidos por un material conglomerante, tradicionalmente es utilizado cemento portland, y de partículas finas generalmente arena natural procedente del río.

#### **4.1.5.1 Propiedades de morteros en estado fresco**

##### **Manejabilidad**

La manejabilidad, que también se conoce como trabajabilidad, es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla, en este caso en las unidades de mampostería o en revestimiento. La manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, que tan dura o blanda es la mezcla cuando se encuentra en estado plástico. Se acepta como medida de la manejabilidad, la característica de fluidez de la mezcla medida en el ensayo de la mesa de flujo (ASTM C-230), aunque hasta el momento dicha propiedad ha dependido de la apreciación subjetiva del albañil o el mampostero. Sin embargo, en la Tabla 2, se sugiere una guía de la manejabilidad requerida para diferentes tipos de construcción y sistema de colocación, en la cual se definen tres tipos de consistencia y fluidez del mortero (Guzmán, 2001).

Tabla 2. Fluidéz recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación.  
Fuente: Guzmán, 2001.

| CONSISTENCIA     | FLUIDEZ (%) | CONDICIONES DE COLOCACIÓN     | EJEMPLOS DE TIPOS DE ESTRUCTURA                             | EJEMPLO DE COLOCACIÓN                             |
|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Dura (seca)      | 80-100      | Secciones sujetas a vibración | Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías            | Proyección neumática, con vibradores de formaleta |
| Media (plástica) | 100-120     | Sin vibración                 | Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos   | Manual con palas y palustres                      |
| Fluida (húmeda)  | 120-150     | Sin vibración                 | Pañetes rellenos de mampostería estructural, autonivelantes | Manual, bombeo, inyección                         |

### Tiempo de Fraguado

Los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla deben estar entre límites adecuados. Por lo general, se aceptan valores entre 2 y 24 horas, respectivamente. Sin embargo, estos dependen de diversos factores tales como las condiciones del clima o la composición de la mezcla y hoy en día son fácilmente controlables con el uso de aditivos (Guzmán, 2001).

### Retención de agua

Es la habilidad que tiene el mortero para retener el agua de mezcla cuando está sujeto a fuerzas de absorción. Esta capacidad de retención de agua en campo se evidencia cuando, después del contacto entre el mortero y una unidad de mampostería de alto grado de absorción, ésta conserva la trabajabilidad. Los morteros que tienen baja retención de agua pierden rápidamente el agua de mezcla y hacen que la colocación de unidades de mampostería sea difícil, mientras que los morteros de alta retención hacen muy fácil la colocación de unidades de mampostería. Por lo tanto, la retención de agua y la absorción de las unidades de mampostería deben ser balanceadas para prevenir que las unidades queden flojas y causen demoras en la construcción (Osorio, 2022).

#### 4.1.5.2 Propiedades del mortero en estado endurecido

##### Retracción

La retracción en morteros se da principalmente por reacciones químicas de hidratación de la pasta sobre todo en pastas de cemento puras sin agregados con una alta relación agua-cemento. La arena soluciona el problema en parte, especialmente si es de textura rugosa, ya que forma un esqueleto que evita los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. En zonas de altas temperaturas y de muchos vientos, el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones internas en el mortero, que se expresan en la formación de grietas visibles. Lo mismo ocurre si la base es muy absorbente, la retracción es proporcional al espesor de la capa de mortero y a la proporción de cemento utilizada. Para evitar la retracción es conveniente usar cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y arenas de buena granulometría con pocos finos (Guzmán, 2001).

##### Densidad

La densidad del mortero dependerá fundamentalmente de sus componentes: arenas, adiciones, etc. También es determinante la granulometría y volumen que éstos ocupen en su dosificación. Además, la relación agua/cemento del mortero incide en la densidad. A medida que aumenta dicha relación, más poroso es el mortero. Se considera que un mortero es ligero, según la norma UNE-EN-998-2, cuando su densidad es igual o menor que 1300 kg/m<sup>3</sup> (Osorio, 2022).

### Resistencia mecánica

En el caso específico de los morteros, la resistencia mecánica está relacionada con la fuerza que puede soportar un área determinada del material después de haber fraguado y endurecido. La resistencia mecánica en los morteros se mide comúnmente mediante pruebas de compresión, donde se aplica una carga gradual al mortero y se registra la cantidad de fuerza que puede resistir antes de experimentar una falla. Una vez puesto en práctica, el mortero debe actuar como unión resistente. Se requiere una alta resistencia a la compresión cuando el mortero deba soportar cargas altas y sucesivas, siendo esta un indicio de las resistencias a tensiones de corte y a tensiones de tracción. El tamaño de los granos de arena está subordinado en su influencia sobre la resistencia y otras cualidades del mortero a la densidad del mortero producido. Se puede suponer que una arena densa, o sea aquella que contenga el menor volumen de poros, al ser mezclada con una proporción dada de cemento, producirá el mortero más denso y en consecuencia resistente. El volumen total de mortero de consistencia plástica será afectado por la cantidad de agua usada y por los volúmenes de los materiales secos. Por ello, un mortero con arena fina y cemento será menos denso que uno con arena gruesa utilizando el mismo cemento, aunque ambas arenas al ser pesadas secas contienen la misma proporción de sólidos y poros. La arena fina tiene más granos por unidad de volumen, por consiguiente, un mayor número de puntos de contacto (Guzmán, 2001). Acorde a su resistencia a compresión, los morteros se pueden clasificar como tipo M, tipo S, N, O y K (ver Tabla 3).

*Tabla 3. Morteros según la clasificación de la norma NTC 3329.*

| <b>Tipo de Mortero</b> | <b>Resistencia a compresión mínima a 28 días (MPa)</b>                        | <b>Aplicaciones comunes</b>                                                                                             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipo M</b>          | 17.2 MPa                                                                      | Mampostería estructural de alta resistencia, cimientos, muros de contención, y estructuras sometidas a cargas elevadas. |
| <b>Tipo S</b>          | 12.4 MPa                                                                      | Mampostería estructural, muros exteriores y estructuras sujetas a moderadas cargas o exposición.                        |
| <b>Tipo N</b>          | 5.2 MPa                                                                       | Muros interiores y exteriores no estructurales, y reparaciones generales.                                               |
| <b>Tipo O</b>          | 2.4 MPa                                                                       | Mampostería interior no estructural, uso en restauración o donde se requiere menor resistencia.                         |
| <b>Tipo K</b>          | < 0.7 MPa (no estandarizada en la ASTM C270, pero reconocida en restauración) | Restauración de mampostería histórica, uso limitado.                                                                    |

### Durabilidad

Es la habilidad para resistir las condiciones de exposición a las cuales es sometido el mortero. Los ciclos de congelamiento y deshielo son considerados el principal efecto de deterioro en los países de estaciones, mientras que las sustancias agresivas tales como sulfato y ácidos son los factores que afectan la durabilidad en países tropicales como Colombia. La durabilidad es una característica de combinación particular de materiales que incluye, además de los constituyentes del mortero, la calidad de las unidades

de mampostería empleada. La elaboración del mortero ha pasado de hacerse en obra a convertirse en un mortero industrializado con propiedades específicas acorde a su aplicación (Osorio, 2022).

### **Apariencia**

Es lo primero que se debería tener en cuenta y que en muchos casos es olvidado, ya que cobra mayor importancia especialmente en mampostería de ladrillo a la vista. En este caso, la plasticidad de la mezcla, la selección y la dosificación adecuada de sus componentes, son de vital importancia en la colocación y el acabado de las superficies. El color y la textura pueden mejorarse con colorantes inorgánicos o con aditivos especiales (Guzmán, 2001). El mortero de enchape diseñado para espacios interiores, con aplicación tipo baldosas, se convierte en un componente esencial para crear ambientes atractivos y duraderos.

## **4.2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE**

### **4.2.1 Utilizando ceniza volante en la fabricación de geopolímeros**

Rangan et al. (2008) utilizaron ceniza volante con bajo contenido de calcio (menos del 5%) para hacer un concreto geopolimérico como una alternativa al tradicional. Al usar 100% de ceniza volante clase F como precursor lograron resistencias a la compresión entre 40 y 50 MPa después de 7 días de curado a 60 °C. También observaron que más tiempo de curado y temperaturas más altas aumentaban la resistencia. Las partículas de la ceniza fueron en su mayoría menores a 50 micras, y el contenido de sílice y aluminio en conjunto un 80% en masa, con una relación cercana a 2 esto significa que, por cada átomo de aluminio, hay más o menos dos átomos de silicio. El objetivo de este estudio fue reemplazar el cemento Portland con un material más ecológico que aprovecha un residuo industrial.

Zhang et al. (2016) realizaron una revisión técnica y científica sobre los geopolímeros basados en cenizas volantes, enfocándose en su producción limpia, propiedades fisicoquímicas y aplicaciones potenciales. El objetivo principal fue mostrar cómo estos materiales pueden reemplazar al cemento Portland para mitigar el impacto ambiental de la industria de la construcción. Entre los principales hallazgos, los autores resaltan que los geopolímeros de ceniza volante pueden alcanzar resistencias a compresión comparables o superiores a las del cemento convencional, especialmente cuando se optimizan la relación Si/Al y el contenido de activadores alcalinos (por ejemplo, NaOH y silicato de sodio). Además, muestran una notable resistencia a ambientes agresivos, como los ácidos y sulfatos, y un bajo coeficiente de permeabilidad.

Davidovits (2002) investigó la viabilidad de las cenizas volantes en la formación de geopolímeros y determinó las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos. Además, se llevaron a cabo análisis microestructurales mediante técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD) para caracterizar la estructura interna y la formación de fases del gel geopolimérico. Los resultados mostraron que los geopolímeros basados en cenizas volantes presentan una resistencia a la compresión comparable o superior a la del cemento Portland, especialmente cuando se optimizan las condiciones de activación alcalina. Los análisis microestructurales revelaron una matriz densa y homogénea, indicando una buena formación del gel N-A-S-H (sodio-aluminosilicato hidratado), responsable de las propiedades mecánicas del material.

### **4.2.2 Utilizando residuos de ladrillo en la fabricación de geopolímeros**

Las pastas geopoliméricas basadas en ladrillo y activados con soluciones de silicato y NaOH, combinados con cemento Portland (20%), dieron como resultado una resistencia a la compresión máxima de 102,6 MPa a los 28 días y a 25 °C; este valor es dos veces superior a la resistencia obtenida con mezclas sin OPC y 7,3 veces superior a la obtenida con hidróxido de sodio. Los resultados demostraron la viabilidad de utilizar estos materiales para producir elementos de construcción estructurales y no estructurales (Robayo et al., 2016).

Fořt et al., (2019) analizó cómo el polvo de ladrillo, un residuo cerámico con bajo contenido de fase amorfa, puede ser activado alcalinamente para formar geopolímeros. Se enfocaron en analizar variables como el módulo silicato del activador y la temperatura de curado mostrando que estas afectan la microestructura y propiedades térmicas de los materiales resultantes. Los investigadores prepararon varias mezclas de geopolímeros utilizando polvo de ladrillo como materia prima, aplicando diferentes activadores alcalinos y condiciones de curado. Los resultados indicaron que la tasa de reacción en las primeras etapas disminuye con el aumento del módulo silicato y la temperatura de curado. Esto se atribuye al bajo contenido de fase amorfa en el polvo de ladrillo, lo que ralentiza la geopolimerización

en comparación con geopolímeros basados en precursores como el metacaolín. La microestructura más compacta se observó en geopolímeros con mayor tasa de reacción inicial, a medida que aumentaba el módulo silicato y disminuía la temperatura de curado la compactación disminuía y el volumen específico de poros aumentaba. El análisis térmico mostró una disminución en la pérdida de peso con el aumento del módulo silicato para todas las temperaturas, siendo la deshidratación de los geles N-A-S-H y C-A-S-H los factores más importantes. La mayoría de las fases cristalinas detectadas por DRX en los geopolímeros diseñados son idénticas a las encontradas en el precursor crudo, lo que indica una geopolymerización parcial y la presencia de una cantidad significativa de partículas no reaccionadas. Para geopolímeros curados a 60 °C y 80 °C, se observó la formación de fases zeolíticas; sodalita y chabazita se encontraron solo en mezclas con mayor tasa de reacción, mientras que la gismondina apareció en geopolímeros con mayor módulo silicato.

#### **4.2.3 Utilizando residuos de vidrio en la fabricación de geopolímeros**

Partículas de vidrio con finuras Blaine entre 1000 a 4000 cm<sup>2</sup>/g, fueron estudiadas para producir geopolímeros a diferentes temperaturas de curado (20, 40 y 60°C), empleando activadores alcalinos como KOH y NaOH. El estudio demostró que el residuo de vidrio sódico se puede utilizar como material de partida para la producción de geopolímeros. Destacan que a diferencia de los geopolímeros a base de metacaolín, donde requieren de silicato líquido para su fraguado y endurecimiento, en las mezclas donde se emplea residuos de vidrio con alta proporción de álcalis, se necesita una temperatura de reacción de 40 o 60°C para obtener resistencias superiores a 50 MPa (Cyr et al., 2012).

Los residuos de demolición y construcción representan entre el 45 y el 65% de toda la basura que llega a los vertederos, lo cual es un valor alto. Entre estos materiales está el vidrio, el cual es 100% reciclable, pero, aun así, en Estados Unidos solo se recicla el 33%, mientras que en Europa el promedio llega al 42,6%. Henao Ríos et al. (2023) se propusieron reutilizar el vidrio de desecho para fabricar geopolímeros, usando diferentes precursores como residuos de ladrillo, baldosas cerámicas y metacaolín. El vidrio se probó de tres formas: como precursor, como activador alcalino y como agregado fino. Lo interesante es que las mejores resistencias se lograron cuando se usó un activador alcalino a base de silicato de sodio, alcanzando más de 25 MPa. Cuando se usó el vidrio como precursor en un 50%, se llegó a unos 15 MPa, pero si se usaba solo vidrio como activador sólido, la resistencia se redujo significativamente. Al producir morteros (no solo pastas) la resistencia se incrementó notablemente. Esto parece deberse a que las partículas finas de vidrio que no reaccionan funcionan como relleno, ayudando a densificar el material y por tanto incrementar la resistencia. De hecho, lograron resistencias entre 10 y 15 MPa, suficientes para usarlos como mortero de revoque o para fabricar baldosas decorativas.

El vidrio mixto coloreado fue estudiado para la fabricación de morteros arquitectónicos decorativos. En los morteros se reemplazaron diferentes porcentajes (0, 33, 66 y 100% del volumen) de grava calcárea por vidrio reciclado. Los resultados que se obtuvieron muestran que el cambio de gravas calcáreas por cascotes de vidrio de similar distribución granulométrica permite reducir la dosificación del superplastificante para obtener la misma trabajabilidad del mortero fresco, lo cual no afecta significativamente las prestaciones mecánicas, la permeabilidad al vapor de agua y la absorción de agua por capilaridad, pero reduce significativamente la deformación por contracción por secado. El vidrio reciclado usado se clasifica como no reactivo en términos de la reacción álcali-sílice en presencia de agua o en solución de NaOH (Tittarelli et al., 2018).

(Lu & Poon, 2018) emplearon residuos de vidrio sódico-cálcico simultáneamente como precursor y agregados finos para la elaboración de morteros álcali activados a partir de cenizas volantes y escorias.

Se investigó la influencia de los residuos de vidrio en formas de casco y polvo sobre la trabajabilidad, las resistencias a la compresión y a la flexión, y la resistencia al fuego de mortero AAC. Los resultados experimentales mostraron que la trabajabilidad aumentaba gradualmente en la medida que aumentaba el nivel de reemplazo de arena natural por casco de vidrio, y mejoraba significativamente al disminuir las proporciones de agregados. Los datos de propiedades mecánicas indicaron que la resistencia a la compresión se redujo a medida que aumentaba el contenido de casco de vidrio. Sin embargo, para la resistencia a la flexión, el porcentaje óptimo de reemplazo de cascos de vidrio fue del 50%. Debido a la baja reactividad, se observó una reducción en la resistencia cuando se usó polvo de vidrio para reemplazar las cenizas volantes y la escoria. No obstante, en términos de resistencia al fuego, la incorporación de casco de vidrio podría mejorar la resistencia del AAC a exposiciones a altas temperaturas (800 °C). En particular, el mortero AAC preparado con el polvo de vidrio como precursor exhibió una notable resistencia a las altas temperaturas. En general, el uso de residuos de vidrio en el material AAC es factible desde el punto de vista de las propiedades mecánicas y la resistencia al fuego

#### **4.2.4 Sobre la durabilidad de geopolímeros en diferentes ambientes**

Rodríguez (2015) analizó el desempeño de distintos morteros activados alcalinamente cuando se exponen a ataques ácidos, específicamente con ácido clorhídrico y nítrico. Se trabajó con varios tipos de materiales: escoria de alto horno (ESC), un silicoaluminato vítreo cálcico (VCAS), ceniza volante (CV) y un residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). La idea era relacionar la capacidad de neutralización del ácido y la pérdida de masa con el contenido de calcio de cada uno de estos materiales. En general, esa relación se cumplió, excepto con el FCC, que tuvo un comportamiento diferente, probablemente porque fue curado a temperatura ambiente y sus reacciones químicas fueron más lentas, generando productos menos resistentes. También se hizo un ensayo más exigente, sumergiendo probetas en ácido nítrico con pH 0, la mezcla con CV presentó la mejor durabilidad, con solo un 3.8% de pérdida de masa, lo que indica que los geles N-A-S-H que se forman con este material son bastante estables en medios ácidos. En cambio, el FCC perdió el 38.4% de su masa, lo que refleja su poca estabilidad. Durante los ensayos se midió el pH para ver cómo cada material afectaba la acidez del medio. El OPC y la ESC lograron subir más el pH, gracias a su alto contenido de calcio. El FCC, sin embargo, terminó con un pH más alto que el VCAS y la CV, pero eso no se tradujo en una mejor resistencia. En cuanto a la microestructura, bajo el microscopio óptico no se notó un frente claro de ataque ácido porque el daño fue más bien superficial. El árido silíceo actuó como una especie de barrera. Solo se analizaron al detalle las muestras de OPC y FCC con microscopía electrónica (FESEM), y no se encontró evidencia de lixiviación en las pastas. Lo que sí se pudo observar fue una alta presencia de silicio en los áridos, y combinaciones de silicio con calcio en OPC, y de silicio con aluminio en FCC.

En concretos geopoliméricos elaborados a partir de ceniza volante tipo F se ha evaluado su durabilidad frente a ambientes químicamente agresivos, como soluciones de sulfato, ácido y turba, que simulan condiciones hostiles presentes en suelos de Indonesia. En este contexto, se expusieron muestras de geopolímero a soluciones de sulfato de sodio y magnesio, ácido sulfúrico y turba durante 12 meses, observando que el material mostró una notable resistencia frente a sulfato de sodio, ácidos diluidos y turba, mientras que el sulfato de magnesio redujo significativamente su resistencia a compresión. Estos resultados evidencian que el concreto geopolimérico basado en ceniza volante es una alternativa viable y duradera al concreto convencional en regiones tropicales con suelos problemáticos y exposición a agentes químicos agresivos, contribuyendo a la sostenibilidad y vida útil de las infraestructuras (Patrisia et al., 2022)

Işıkdağ y Yalghuz (2023) investigaron la resistencia y durabilidad de morteros geopoliméricos (GMs) elaborados con metacaolín (MK) y diversas puzolanas, incluyendo escoria de alto horno granulada molida (GGBFS), humo de sílice (SF), perlita calcinada molida (GCP) y perlita cruda (RP). Las mezclas fueron activadas con hidróxido de potasio (KOH) y metasilicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), manteniendo una relación sólido/líquido de 1.45 y una relación de activador alcalino de 2.0. Algunos morteros fueron sometidos a condiciones de curado térmico. Se encontró que los GMs que incluían MK y GGBFS, curados térmicamente, alcanzaron una resistencia a la compresión de hasta 88 MPa. Los análisis microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de rayos X (EDX) y difracción de rayos X (XRD) revelaron la formación predominante de estructuras aluminosilíceas, con presencia de potasio proveniente del KOH y calcio de la GGBFS. Las imágenes SEM mostraron cristales de cuarzo de aproximadamente 6–7  $\mu\text{m}$  incrustados en la matriz del gel. Para evaluar la durabilidad, los GMs curados térmicamente fueron expuestos a soluciones de  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y HCl. Los resultados indicaron que los GMs curados térmicamente presentan una resistencia superior y una durabilidad adecuada frente a estos ambientes agresivos, en comparación con los GMs no curados térmicamente. Además, el uso de puzolanas en los GMs resultó en mejoras tanto en resistencia como en durabilidad.

## 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología de esta investigación se dividió en cuatro fases (Figura 1), las cuales corresponden con el alcance de cada uno de los objetivos específicos. La primera fase consistió en la selección, adecuación y caracterización de las materias primas. En la segunda fase, se diseñaron y se prepararon las mezclas específicas de pastas y morteros. En la tercera fase se realizó la caracterización físico-mecánica de los morteros, así como también la durabilidad de estos en ambientes de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) y posteriormente, en la cuarta fase se realizó el elemento de enchape con las mezclas que, en general, mostraron mejores resultados.



Figura 1. Esquema general de la metodología experimental de la investigación.

### 5.1 Fase 1: Selección, adecuación y caracterización de materias primas

#### 5.1.1 Materias primas

##### Cemento Portland UG (OPC)

Para esta investigación, se utilizó cemento Portland ordinario tipo UG de la marca Argos, diseñado para aplicaciones de uso general (Figura 2). Para la caracterización, se recurrió a la información técnica proporcionada por el fabricante:

- Tiempo de fraguado, ensayado mediante el método de Vicat (NTC 118).
- Resistencia a la compresión a las edades de 3, 7 y 28 días (NTC 220).

##### Residuo de ladrillo (RL), Ceniza volante (CV) y Vidrio impalpable

Estas materias primas fueron suministradas por el Grupo de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales. La ceniza fue recolectada de la empresa Ladrillera Lago Verde. Las materias primas fueron caracterizadas mediante los siguientes ensayos:

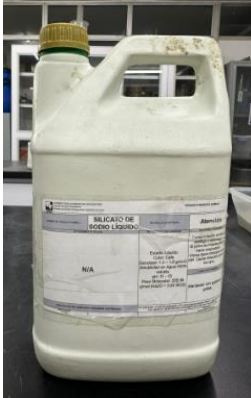
- **Tamaño de Partícula:** Los residuos de ladrillo se trituraron y molieron en un molino de bolas hasta alcanzar tamaños de partícula similares a los del cemento portland. El tamaño de partícula promedio se determinó utilizando un Mastersizer.
- **Composición Química:** Se determinó utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda secuencial Axios mAX (WDXRF).
- **Composición Mineralógica:** Se determinó utilizando difracción de rayos X (XRD).

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| <b>a)</b>                                                                         | <b>b)</b>                                                                         | <b>c)</b>                                                                          | <b>d)</b>                                                                           |
| OPC                                                                               | RL                                                                                | CV                                                                                 | Vidrio impalpable                                                                   |

*Figura 2. Materias primas. (Fuente: Elaboración propia)*

### 5.1.2 Activadores alcalinos

Como activadores alcalinos para la elaboración de los geopolímeros se empleó Silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) comercial e hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ). Estos productos cuentan con una ficha técnica proporcionada por el fabricante, así el silicato de sodio tiene un módulo de solución ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,68$ ) y el hidróxido de sodio (en escamas) una pureza del 98.11%. Estos activadores fueron suministrados por el Grupo de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales.

|                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
| <b>a)</b>                                                                           | <b>b)</b>                                                                             |
| Silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )                                     | Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ )                                                  |

*Figura 3. Activadores alcalinos. (Fuente: Elaboración propia)*

### 5.1.3 Agregado fino

Para la elaboración de los morteros de arena de río, se utilizó agregado fino natural obtenido del río Cauca. Antes de su incorporación en las mezclas, el material fue sometido a un proceso de tamizado a través del tamiz No. 16, con el propósito de garantizar una granulometría adecuada y optimizar su desempeño en la mezcla.

Para la obtención de los morteros ecológicos con arena de vidrio, se recolectó vidrio en desuso provenientes del reciclaje dentro de la Universidad. Una vez recolectado, el vidrio fue lavado para eliminar la suciedad y posteriormente secado a temperatura ambiente. Luego, el material fue llevado a una trituradora de mandíbulas hasta alcanzar un tamaño de partícula adecuado para su procesamiento en el molino de discos (Figura 4) donde se redujo aún más su granulometría. Posteriormente, se realizó un tamizado utilizando pasa tamiz No. 16 y el retenido No. 100, con el objetivo de garantizar una distribución granulométrica adecuada y optimizar su desempeño en la mezcla.



*Figura 4. Agregados finos. (Fuente: Elaboración propia)*

## 5.2 Fase 2: Diseño y preparación de las mezclas (pastas)

Se elaboraron dos grupos de pastas, el primer grupo consistió en un material convencional basado en la mezcla de 80% OPC y 20% de cementante suplementario (CV, RL y residuo de vidrio). El segundo grupo corresponde a un material álcali-activado, obtenido a partir de los mismos residuos nombrados anteriormente, y una adición de 10% de OPC.

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo los parámetros establecidos en la NTC 112 para la producción de pastas basadas en OPC. Las materias primas fueron mezcladas en mezcladoras Hobart en el Laboratorio de Materiales Cerámicos y Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales. El proceso de mezclado, aplicado a todas las mezclas, consistió en un mezclado inicial de 30 segundos a velocidad baja, seguido de una interrupción de 15 segundos para remover el material adherido a las paredes del recipiente, y un mezclado final de 60 segundos a velocidad media o alta.

Inicialmente, se fabricaron pastas basadas en cemento Portland (OPC) con una relación agua/cemento (A/C) de 0.4, la cual se determinó como adecuada tras analizar la fluidez de la mezcla ya que se buscaba que la mezcla sea fluida para la creación de las fachaletas. Los residuos CV, RL y vidrio fueron empleados como reemplazo parcial de OPC en proporciones de 20% en peso. Estas pastas fueron vaciadas en moldes de silicona con dimensiones cúbicas de 20 mm por lado (Figura 5). Las mezclas vaciadas fueron curadas a temperatura ambiente, dentro de una cámara de curado donde las pastas permanecen sumergidas en una solución con agua-cal. Estas mezclas fueron evaluadas a compresión a edades de 7, 28 y 90 días.

Se elaboraron adicionalmente dos pastas geopoliméricas, compuestas por CV+Vidrio+OPC y RL+Vidrio+OPC las cuales fueron activadas con una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio, se utilizó una relación L/S de 0.3, adecuada en función de la fluidez de la mezcla. Estas pastas, producidas en los mismos moldes de 20 mm de lado, fueron colocadas en bolsas ziploc para no perder humedad y curadas en un recipiente plástico el cual contenía una espuma húmeda.

Las mezclas y proporciones correspondientes fueron (% en peso):

- 100% Cemento Portland (pasta de referencia)
- 80% OPC - 20% ceniza volante
- 80% OPC - 20% vidrio
- 80% OPC - 20% residuo de ladrillo
- Pasta geopolimérica: 80% ceniza volante - 10% vidrio reciclado - 10% OPC
- Pasta geopolimérica: 80% residuo de ladrillo -10% vidrio reciclado - 10% OPC



Figura 5. (izq) Pasta de cemento vaciada en molde y (der) cubos desencoformados. (Fuente: Elaboración propia)

Las dosificaciones de las mezclas (100 g de materia prima) se muestran en la (Tabla 4). En el caso de las mezclas álcali activadas las relaciones molares fueron  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ : 6 y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ : 0.2 para las basadas en ceniza volante y de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5.6 y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ : 0.16 para las basadas en residuo de ladrillo (Henaó Ríos, et al., 2023). Estas relaciones fueron suministradas por el Grupo Materiales Compuestos y se basan en resultados de investigaciones previas.

Tabla 4. Dosificación de las pastas.

| ID Mezclas         | Relación |      |         |    |    |        | Silicato-Na<br>(líquido) | NaOH |
|--------------------|----------|------|---------|----|----|--------|--------------------------|------|
|                    | L/S      | Agua | Cemento | CV | RL | Vidrio |                          |      |
|                    |          |      |         |    |    | (gr)   |                          |      |
| 100% OPC           | 0,4      | 40   | 100     |    |    |        |                          |      |
| 80% OPC 20%CV      | 0,3      | 40   | 80      | 20 |    |        |                          |      |
| 80% OPC 20% RL     | 0,3      | 40   | 80      |    | 20 |        |                          |      |
| 80% OPC 20% Vidrio | 0,3      | 40   | 80      |    |    | 20     |                          |      |

|                                  |     |       |    |    |    |       |      |
|----------------------------------|-----|-------|----|----|----|-------|------|
| <b>80% CV 10% Vidrio 10% OPC</b> | 0,3 | 15,58 | 10 | 80 | 10 | 38,77 | 7,64 |
| <b>80% RL 10% Vidrio 10% OPC</b> | 0,3 | 19,06 | 10 | 80 | 10 | 29,17 | 7,82 |

### 5.2.1 Caracterización de las pastas

#### Tiempo de Fraguado

En la (Figura 6), se determina el tiempo de fraguado, se aplicó el ensayo de penetración o el ensayo de Vicat, de acuerdo con la norma NTC 4088 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2022).



Figura 6. Montaje de ensayo de Vicat. (Fuente: Elaboración propia)

#### Densidad, porosidad y absorción

Este ensayo se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C642, con el objetivo de determinar la densidad, absorción de agua y porosidad de las pastas en estudio (Figura 7). Para ello, se emplearon probetas curadas durante 28 días bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. El procedimiento comenzó con el secado de todas las muestras en un horno a 100-110°C hasta alcanzar un peso constante, tras lo cual fueron pesadas en una balanza de precisión para registrar su masa seca. Luego, las muestras fueron sumergidas en agua a temperatura ambiente durante al menos 24 horas, permitiendo su saturación completa. Posteriormente, se secó el exceso de agua superficial y se realizó una nueva pesada para determinar la masa saturada en superficie seca. Finalmente, las muestras fueron sumergidas nuevamente en agua y pesadas dentro del líquido utilizando una balanza hidrostática, obteniendo así la masa sumergida, con la cual se calcularon los parámetros de densidad, absorción y porosidad.



Figura 7. Montaje del ensayo densidad, porosidad y absorción de las pastas. (Fuente: Elaboración propia)

### Determinación de la resistencia a compresión

La resistencia a la compresión a edades de 7, 28, y 90 días de curado fueron realizada en moldes cúbico de 20 mm de arista, para este ensayo según la norma NTC 220. Las muestras fueron ensayadas en una Máquina Universal Tinius Olsen con capacidad de 50 kN.

### 5.3 Fase 3: Diseño y caracterización físico-mecánica de los morteros

Los morteros (Figura 8) fueron elaborados a partir de las mezclas previamente mencionadas (ver tabla 5), utilizando como agregado fino arena de río y arena de vidrio reciclada en una proporción (C:A) 1:2. En las mezclas de mortero la proporción de agua en relación líquido/sólido (L/S, ver Tabla 5) se ajustó para alcanzar una adecuada trabajabilidad que permitiera el vaciado del mortero en moldes como placas y fachaletas.



Figura 8. Morteros encofrados en moldes cúbicos (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 5. Dosificación de las mezclas con arenas.

| Mortero            | Proporción Relación |      | Gramos |         |              |     |     |        |             |       |
|--------------------|---------------------|------|--------|---------|--------------|-----|-----|--------|-------------|-------|
|                    | C:A                 | L/S  | Agua   | Cemento | Arena vidrio | CV  | RL  | Vidrio | Silicato-Na | NaOH  |
| 100% OPC           | 1:2                 | 0,58 | 180    | 300     | 600          |     |     |        |             |       |
| 80% OPC 20%CV      | 1:2                 | 0,6  | 180    | 240     | 600          | 60  |     |        |             |       |
| 80% OPC 20% RL     | 1:2                 | 0,6  | 180    | 240     | 600          |     | 60  |        |             |       |
| 80% OPC 20% Vidrio | 1:2                 | 0,6  | 180    | 240     | 600          |     |     | 60     |             |       |
| 80% CV 10% Vidrio  |                     |      |        |         |              |     |     |        |             |       |
| 10% OPC            | 1:2                 | 0,17 | 101,05 | 30      | 600          | 240 |     | 30     | 116,31      | 22,92 |
| 80% RL 10% Vidrio  |                     |      |        |         |              |     |     |        |             |       |
| 10% OPC            | 1:2                 | 0,16 | 106,78 | 30      | 600          |     | 240 | 30     | 87,51       | 23,46 |

Los morteros basados en OPC fueron curados bajo agua hasta completar la edad requerida para cada ensayo de caracterización, mientras que los morteros álcali-activados se curaron en cámara húmeda.

### 5.3.1 Caracterización en estado fresco

#### Ensayo de fluidez de morteros elaborados con arenas de río y vidrio

Según la norma NTC 5784 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021), la fluidez de la pasta y el mortero de cemento Portland se evalúa mediante una mesa de flujo, determinando la capacidad de la mezcla para expandirse bajo impactos controlados (Figura 9). Para el cálculo de la fluidez se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio} - 101.6\text{mm}}{101.6\text{mm}} * 100$$

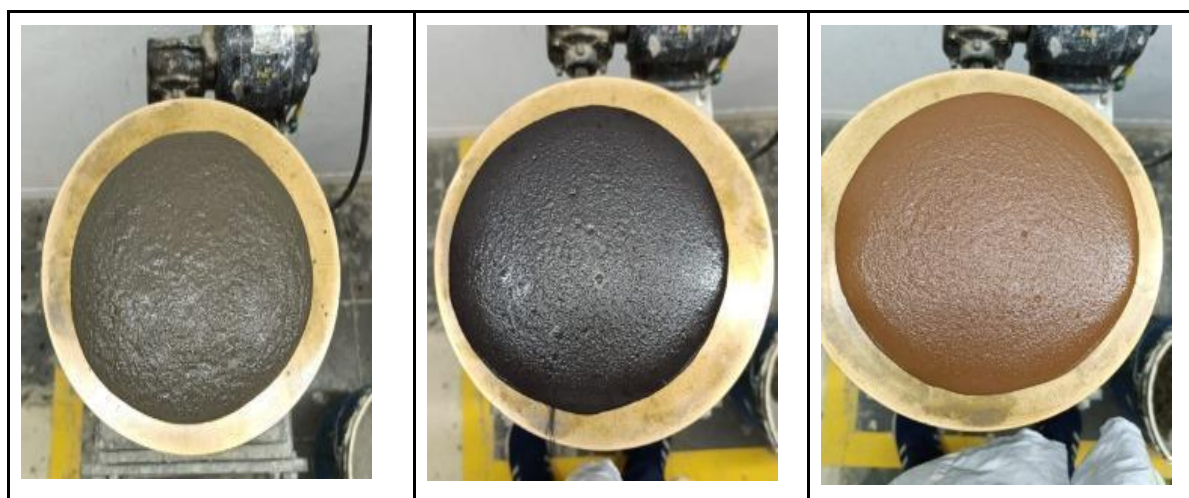


Figura 9. Ensayo de fluidez en mesa de flujo. (Fuente: Elaboración propia) .

### 5.3.2 Caracterización en estado endurecido

#### Densidad, porosidad y absorción de morteros

De igual manera que en las pastas, se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C642 para determinar la densidad, absorción y porosidad. Siguiendo la norma se toman varios pesos como son seco, saturado en agua, hervido y balanza hidrostática (Figura 10).



Figura 10. Montaje del ensayo densidad, porosidad y absorción de morteros. (Fuente: Elaboración propia)

#### Succión capilar de los morteros

Este ensayo se realizó siguiendo la norma ASTM C1585 (American Society for Testing and Materials, 2020), la cual establece un método para evaluar la absorción de agua por capilaridad en materiales cementicios. Las mezclas fueron acondicionadas en un ambiente con humedad relativa controlada para garantizar una condición de humedad uniforme en el sistema capilar del concreto. Para este estudio, se seleccionaron tres mezclas con arena de río y tres con arena de vidrio: OPC, OPC + CV y OPC+AA+CV. La toma de datos se realizó en los siguientes intervalos: a los 5, 10, 20, 30 y 60 minutos, luego cada hora hasta completar 6 horas y, finalmente, una vez al día hasta alcanzar los 7 días.

#### Resistencia a compresión de morteros

El ensayo de resistencia a la compresión a 7, 28, y 90 días de curado fue realizado según la norma NTC 220 utilizando especímenes cúbicos de 50 x 50 x 50 mm (Figura 11). Inicialmente, se inspeccionaron las superficies de carga de los cubos para asegurarse de que estuvieran planas y libres de impurezas, garantizando así un contacto uniforme con la máquina de compresión. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en la prensa hidráulica CT-1500 con capacidad de 1.500 kN y se ensayaron a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min, conforme a lo estipulado en la normativa vigente. Finalmente, cada muestra fue sometida a carga axial hasta su falla, registrando la carga máxima soportada.



Figura 11. Montaje de ensayo para resistencia a la compresión de morteros. (Fuente: Elaboración propia)

### Resistencia a la flexión para morteros

Se realizó la prueba de flexión siguiendo la norma ASTM C348 (*Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*), se utilizaron 3 probetas tipo vigas de dimensiones 40x40x160 mm. Esta prueba fue realizada a los morteros que, en general, mostraron el mejor desempeño y fueron empleados para elaborar las fachaletas.



Figura 12. Ensayos de flexión en vigas. (Fuente: Elaboración propia)

### 5.3.3 Evaluación de la durabilidad de morteros en ambientes agresivos (ácido y sulfatos)

#### Morteros producidos con arena de río y vidrio, sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

Los cubos de morteros de 50 x 50 x 50 mm fueron sumergidos en una solución de ácido acético  $\text{CH}_3\text{COOH}$  con una concentración 0.1 molar a un pH de 2,9. Por cada mezcla de mortero se sumergieron 9 cubos, los cuales fueron dejados hasta completar edades de 28, 90 y 120 días. En cada periodo fueron retirados para realizar inspección visual y determinar la resistencia a compresión (prensa hidráulica CT-1500), el cual por cada edad se evaluaron tres muestras. Adicionalmente, los cubos fueron pesados antes de ingresarlos en la solución de ácido, y cuando se retiraba a cada edad en estudio, con esta información

se calculó la diferencia de peso en cada etapa y se comparó al valor inicial registrado antes de la inmersión.

#### **Morteros producidos con arena de río y vidrio, sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ )**

Los cubos de morteros de 50 x 50 x 50 mm fueron sumergidos en una solución de sulfato de magnesio con una concentración del 5% (50g/l) y un ph entre 6 - 8. Por cada mezcla de mortero se sumergieron 9 cubos, los cuales fueron dejados hasta completar edades de 28, 90 y 120 días. Posteriormente fueron retirados para realizar inspección visual y determinar la resistencia a compresión (prensa hidráulica CT-1500), cabe resaltar que por edad se evaluaron 3 muestras. Los cubos fueron pesados antes de ingresarlos en la solución de sulfato, y cuando se retiraba a cada edad en estudio, se calculó la diferencia de peso en cada etapa con respecto al valor inicial registrado antes de la inmersión.

Adicionalmente, se fabricaron 2 vigas por cada mezcla, y se sumergieron en la solución de sulfato para medir la expansión a edades de 28, 90 y 120 días con el objetivo de evaluar su comportamiento dimensional a lo largo del tiempo y su resistencia a los agentes químicos a los que fueron expuestas. La expansión de las diferentes mezclas de mortero se midió mediante marcas: se realizó una marca en la mitad de la viga y, posteriormente, otras líneas a 50 mm de distancia de la marca central, identificadas con los números 1 y 2 (Figura 13), con el fin de medir la expansión en cada lado.



*Figura 13. Muestra de vigas y marcas para medición de expansión. (Fuente: Elaboración propia)*

#### **5.3.4 Evaluación del desempeño de morteros a alta temperatura**

##### **Exposición a 800 °C**

Se prepararon dos cubos de mortero de dimensiones 50x50x50 mm de las mezclas OPC, OPC+CV, OPC+Vidrio y OPC+AA+CV, elaboradas con arena de río y con arena de vidrio. Tras un curado de 28 días y un periodo de estabilización a temperatura ambiente (24 h), las probetas fueron sometidas a la prueba térmica en horno eléctrico. El calentamiento se realizó de forma controlada a 2°C/min hasta alcanzar 800°C, temperatura que se mantuvo durante 2 horas. La elección de 800°C se hizo por analogía con estudios previos sobre la respuesta térmica de geopolímeros y sistemas cementantes que emplean exposiciones en el rango 600–1.200°C (Villaquirán-Caicedo et al., 2015). Se determinó el peso y dimensiones de las muestras antes de introducirlas al horno y cuando fueron retiradas, para calcular los cambios producidos por la alta temperatura. En la (Figura 14), se presentan imágenes del montaje de

las probetas en el horno. Este ensayo fue complementario y por tanto no se realizó para todas las mezclas.



*Figura 14. Probetas organizadas dentro del horno para ensayo térmico a 800°. (Fuente: Elaboración propia)*

#### **5.4 Fase 4: Validación del potencial de aplicación**

Utilizando las mezclas de morteros que presentaron el mejor desempeño en los ensayos realizados anteriormente, se elaboró un prototipo de fachaletas. Cabe destacar que la aplicación de este tipo de elementos en la industria de la construcción constituye una innovación significativa, al proponer una alternativa sostenible y eficiente. Además, las fachaletas desarrolladas demostraron ser más livianas que las fachaletas comerciales convencionales, lo que representa una ventaja en la reducción del peso propio de los elementos decorativos de enchape y refuerza su atractivo para aplicaciones constructivas.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1 Fase 1: Selección, adecuación y caracterización de materias primas y activadores

#### 6.1.1 Materias primas

En la Tabla 6, se muestran los resultados de la caracterización de las materias primas OPC, CV, RL y residuo de vidrio utilizadas en el presente trabajo. Como se aprecia, la CV y el RL corresponden a aluminosilicatos y el residuo de vidrio es de tipo sódico cálcico.

Tabla 6. Caracterización de materias primas. (Fuente: Henao Ríos et al., 2023)

|                                | COMPUESTO<br>(% en masa)          | OPC  | Ceniza volante<br>CV | Residuo de<br>Ladrillo<br>RL | Residuo de<br>Vidrio |
|--------------------------------|-----------------------------------|------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| <b>Composición<br/>química</b> | $SiO_2$                           | 17,9 | 48,35                | 58,89                        | 72,27                |
|                                | $Al_2O_3$                         | 3,9  | 18,18                | 21,29                        | 1,49                 |
|                                | $K_2O$                            | 0,3  | 0,77                 | 1,76                         | 0,51                 |
|                                | $Na_2O$                           | 0,2  | 0,47                 | 0,93                         | 13,37                |
|                                | $Fe_2O_3$                         | -    | 7,99                 | 8,87                         |                      |
|                                | CaO                               | 62,3 | 1,39                 | 2,36                         | 11,15                |
|                                | $TiO_2$                           | -    | 0,94                 | 0,98                         | -                    |
|                                | $P_2O_5$                          | -    | -                    | 0,18                         | -                    |
|                                | $SO_3$                            | -    | 0,4                  | 0,12                         | -                    |
|                                | MgO                               | 1,8  | 0,46                 | 3,12                         | 0,26                 |
|                                | Pérdida por ignición<br>(1000°C)  | 4,1  | 19,27                | 1,12                         | 1,46                 |
|                                | Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )     | 2411 | 2470                 | 2610                         | 2380                 |
|                                | Tamaño medio de partícula<br>(μm) | 21,7 | 20,86                | 24,3                         | 58,7                 |
| <b>Propiedades<br/>físicas</b> | d(0.1) (μm)                       | -    | 1,26                 | 2,8                          | 5,7                  |
|                                | d(0.5) (μm)                       | -    | 11,05                | 46,53                        | 45,4                 |
|                                | d(0.9) (μm)                       | -    | 56,37                | 191,3                        | 131,5                |

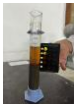
El activador alcalino consistió en una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) con silicato de sodio (SS,  $Na_2SiO_3$ ). El NaOH se presentó en escamas y presentó una pureza del 98,11 %. El silicato de sodio utilizado presentó un módulo de disolución de 2,68 y una composición de 56.5 %  $H_2O$ , 12.1 %  $Na_2O$  y 31.4 %  $SiO_2$  (Henao Ríos et al., 2023).

#### 6.1.2 Agregado fino

##### Agregado fino: arena de río y arena de vidrio

En la Tabla 7, se presentan las propiedades del agregado fino utilizado. El contenido de impurezas de la arena de río, de acuerdo con la escala colorimétrica de Gardner, según la norma NTC 127 se sitúa entre las placas orgánicas No2 y No3 por lo que se consideró que el agregado es óptimo para su uso. El agregado de arena de vidrio muestra una solución completamente transparente, lo que indica que es muy limpio por lo que se consideró que igualmente es óptimo para el uso en los morteros.

Tabla 7. Caracterización de los agregados finos.

| PROPIEDADES FÍSICAS                | Arena de río                                                                      | Arena de vidrio                                                                     |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,41                                                                              | 2,48                                                                                |
| Absorción (%)                      | 4,15                                                                              | 0,23                                                                                |
| Humedad (%)                        | 3,13                                                                              | 0,14                                                                                |
| M.U. suelta (kg/m <sup>3</sup> )   | 1647,84                                                                           | 1604,11                                                                             |
| Porcentaje de vacíos (%)           | 31.61                                                                             | 35,31                                                                               |
| M.U. compacta (kg/m <sup>3</sup> ) | 1726,44                                                                           | 1677,08                                                                             |
| Porcentaje de vacíos (%)           | 28.34                                                                             | 32,35                                                                               |
| Materia Orgánica                   |  |  |
| Módulo de Finura (%)               | 2.36                                                                              | 2.18                                                                                |
| Tamaño Máximo (Tamiz)              | 3/8                                                                               | No.8                                                                                |

En la Figura 15, se presenta la distribución granulométrica de los agregados finos utilizados. La curva obtenida se compara con los límites (Máx y Min) sugeridos por la NTC 174 (Especificaciones de los agregados para concreto) para los valores de tamiz pasa No.16 hasta el tamiz No. 200.

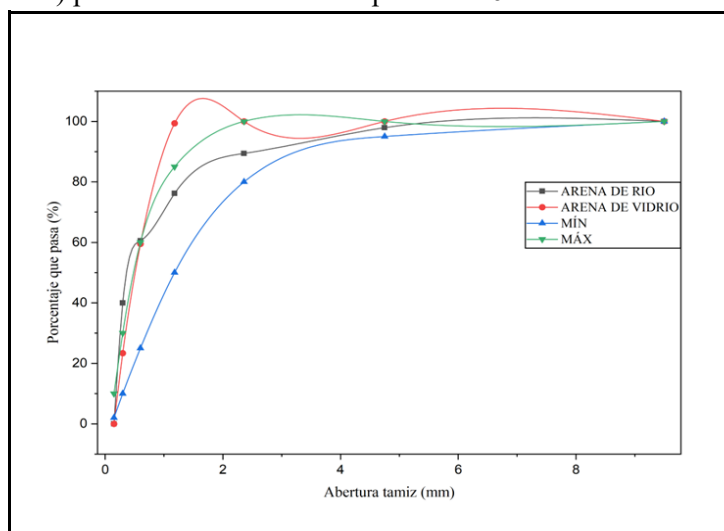


Figura 15. Distribución granulométrica para arenas de río y arena de vidrio.

## 6.2 Fase 2: Caracterización de pastas

### 6.2.1 Tiempo de fraguado de pastas

En la Figura 16, se muestran resultados del tiempo de fraguado de las pastas. Estos revelan comportamientos distintos entre las seis mezclas cementantes. Al comparar el tiempo de fraguado

inicial (25 mm), de las diferentes mezclas se encontró que en la mezcla OPC ocurrió a los 125 minutos, en OPC+Vidrio a los 130 minutos y en OPC+CV fue de 125 minutos. Este retardo en el fraguado inicial puede atribuirse a la menor reactividad temprana de estos materiales suplementarios, que requieren un tiempo adicional para reaccionar con los hidróxidos liberados durante la hidratación del cemento Portland (Lothenbach et al.,2011).

En cuanto al fraguado final (0 mm), OPC+CV fue de 455 minutos y para OPC+Vidrio fue de 385 minutos, en contraste con los 415 minutos de la mezcla de referencia OPC, Por el contrario, en las pastas álcali-activadas, la mezcla OPC+AA+CV alcanzó los 25 mm de penetración a los 60 minutos, mostrando un inicio de fraguado más rápido que las mezclas anteriores. Esta misma mezcla logró una penetración de 0 mm en aproximadamente 170 minutos, lo que sugiere que el ambiente alcalino promovió una disolución más rápida de las fases aluminosilicatos de la ceniza volante, facilitando la formación temprana de geles de aluminosilicato, lo cual es consistente con los mecanismos propuestos en la activación alcalina (Provis & Van Deventer, 2014). Sin embargo, la mezcla OPC+AA+RL, mostró un tiempo de fraguado inicial de 145 minutos y un fraguado final más prolongado (465 minutos), lo que indica que la reactividad específica del RL en soluciones alcalinas no es tan eficiente para acelerar el fraguado como en el caso de la ceniza, o también que el contenido de fase amorfa reactiva es menor para el RL en comparación a la CV (Rovnaník et al.,2016).

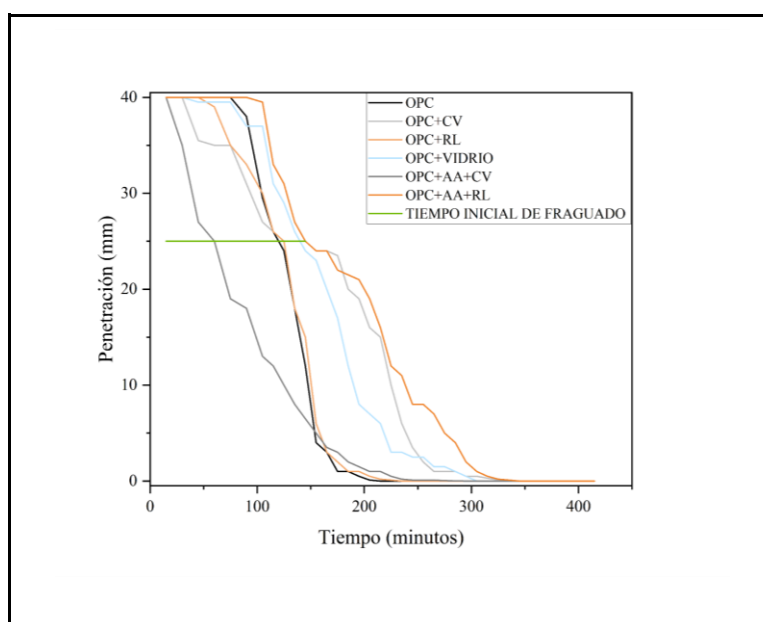


Figura 16. Resultados del ensayo de Vicat.

### 6.2.2 Densidad, absorción y porosidad de pastas

La Figura 17, presenta los resultados de densidad, absorción y porosidad. La mezcla patrón (OPC) muestra una absorción de agua del 19.29%, con una densidad seca de 1.83 g/cm<sup>3</sup>, densidad aparente de 2,74 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad del 33.36%. Cuando se le añade ceniza volante (OPC+CV), la densidad aparente subió un 2,19 g/cm<sup>3</sup>, la absorción alcanza 19.66% y la porosidad pasa de 33,36% hasta 36.16%. La mezcla con residuo de ladrillo molido (OPC+RL) presenta una absorción de 14.85%, pero tiene una porosidad aún más alta, con un 38.72% aunque el material no deja entrar tanta agua fácilmente, sí tiene muchos espacios internamente, lo cual podría afectar otras propiedades como la durabilidad. La mezcla adicionada con vidrio impalpable (OPC+VIDRIO) logró reducir la absorción hasta un 13.91% y además presenta la porosidad más baja entre todas las opciones (28.24%).

En el caso de las mezclas activadas alcalinamente, la mezcla OPC+AA+CV muestra una absorción de 16.19% siendo menor a las pastas basadas en OPC, la densidad fue similar a las mezclas basadas en OPC. Sin embargo, alcanzó el mayor volumen de vacíos con 43,73%; un 10,37% mayor a la mezcla de referencia OPC. En el caso de la mezcla OPC+AA+RL, presentó la absorción después de inmersión más baja (12.53%), sin embargo, su volumen de vacíos fue de 40.24%, lo que indica que, aunque el agua no entra fácilmente, hay muchos espacios internos libres.

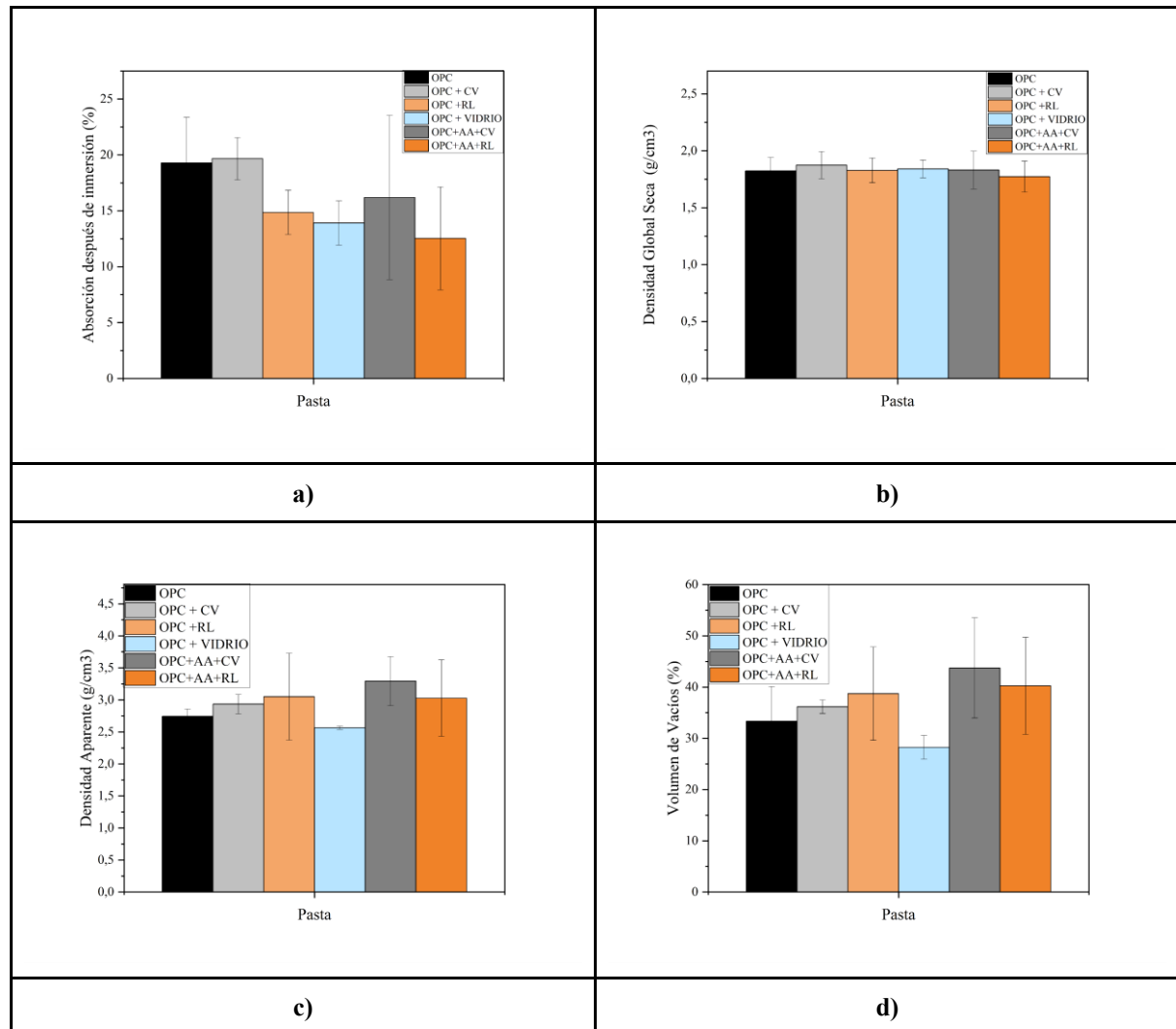


Figura 17. Propiedades físicas de pastas: **a)** absorción después de inmersión, **b)** densidad global seca, **c)** densidad aparente, **d)** volumen de vacíos.

### 6.2.3 Resistencia a compresión

En la Figura 18, se muestran los resultados de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de curado de las pastas. De manera general se encontró que en la medida que avanza la edad de curado, la resistencia a la compresión aumenta para todas las pastas, lo cual es lo esperado. Las pastas basadas en cemento Portland tuvieron resistencias entre 25-40 MPa para edades de curado de 28 días. La pasta adicionada OPC+CV alcanza para todas las edades resistencia comparable a la mezcla de referencia basada exclusivamente en OPC. La mezcla con residuo de ladrillo (OPC+RL) mostró una activación puzolánica tardía, mejorando su resistencia a 90 días (41.10 MPa), lo que sugiere su potencial en aplicaciones que

no requieren alta resistencia inicial (Torres Rubio, et al., 2019). La mezcla con vidrio reciclado (OPC+VIDRIO) destacó por su notable mejora en resistencia a largo plazo (46.71 MPa), atribuible a la reacción del vidrio (rico en SiO<sub>2</sub>) que puede actuar como material puzolánico, reaccionando con la portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) liberada por el OPC para formar C-S-H adicional, mejorando la densidad de la matriz.

Para la edad de 28 días, las pastas álcali activadas tenían en promedio resistencia de 21 MPa. No obstante, estas resistencias fueron inferiores a las basadas en cemento, lo que podría deberse a una dosificación inadecuada de activadores o a las condiciones no adecuadas de curado en ambiente húmedo (en este estudio se curó a temperatura ambiente de 25°C), las cuales, aunque mantienen la humedad, podrían no ser suficientes para optimizar la reacción de activación alcalina. Estudios previos sugieren que el curado térmico a temperaturas entre 60°C y 90°C favorece la formación de geles más resistentes (Torres Rubio et al., 2019). Estos resultados confirman que la activación alcalina requiere condiciones específicas para optimizar el desempeño mecánico, y que materiales como la ceniza volante y el vidrio reciclado pueden mejorar la resistencia a largo plazo de los morteros.

Al comparar las resistencias a los 90 días de las pastas álcali-activadas con las pastas basadas en cemento Portland, se observa que las primeras no presentan un incremento significativo después de las edades iniciales. Este comportamiento es usual en sistemas activados alcalinamente, ya que la mayor parte de la reacción de geopolimerización ocurre en los primeros días de curado, mientras que la ganancia posterior resulta más limitada (Li, Wang & Jiao, 2013). Muchos sistemas álcali activados requieren condiciones de curado térmico a 80 °C para alcanzar su máximo potencial mecánico, mejorando significativamente la polimerización y el desarrollo de geles N-A-S-H y C-A-S-H (Torres Rubio et al., 2019).

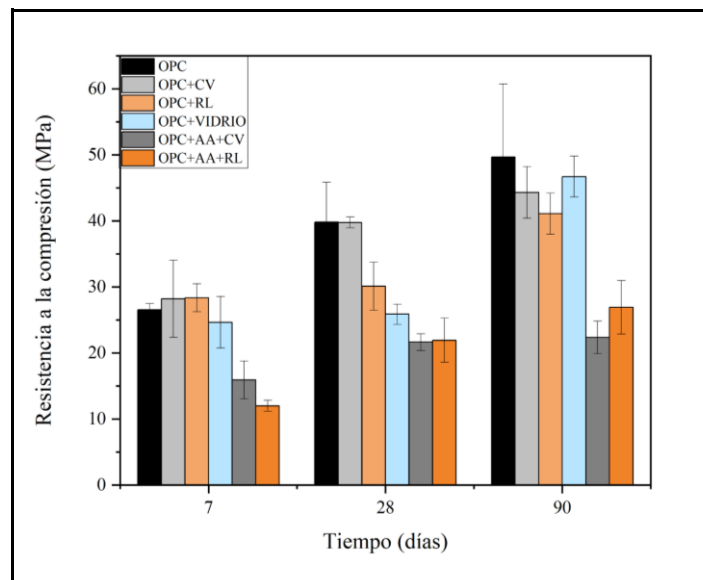


Figura 18. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de pastas.

### 6.3 Fase 3: Caracterización de los morteros

#### 6.3.1 Ensayo de fluidez de los morteros

La fluidez de los morteros (Tabla 8), con diferentes tipos de arena, mostró variaciones en Los resultados muestran que la fluidez de los morteros se mantiene en un rango muy similar en todas las mezclas. Sin

embargo, se observa que el tipo de arena sí influye ligeramente: las mezclas con arena de vidrio tienden a presentar valores de fluidez más altos y más similares que las de arena de río. Esto se puede explicar porque las partículas de vidrio presentan una superficie más lisa, menos porosa y con menor capacidad de absorción de agua, lo que reduce la fricción interna y permite un mayor deslizamiento de las partículas dentro de la mezcla. En cambio, la arena de río suele tener una textura más rugosa, lo que genera mayor fricción entre partículas y una absorción parcial del agua disminuyendo la cantidad de agua libre y, por ende, la fluidez.

En el caso de los morteros álcali activados, los resultados coinciden con lo reportado en el artículo de Lu & Poon, quienes señalaron que el aumento del nivel de reemplazo de arena natural por arena de vidrio mejora la trabajabilidad de los morteros activados alcalinamente (Lu & Poon, 2018).

*Tabla 8. Resultados del ensayo de fluidez de las mezclas de morteros.*

| Tipo de arena  | Fluidez de las mezclas (%) |        |        |            |           |           |
|----------------|----------------------------|--------|--------|------------|-----------|-----------|
|                | OPC                        | OPC+CV | OPC+RL | OPC+VIDRIO | OPC+AA+CV | OPC+AA+RL |
| <b>Natural</b> | 178,05                     | 175,59 | 182,97 | 178,05     | 180,51    | 173,13    |
| <b>Vidrio</b>  | 180,51                     | 178,05 | 178,05 | 180,51     | 182,97    | 180,51    |

### 6.3.2 Densidad, absorción y porosidad

Los resultados de absorción (Figura 17) mostraron de manera general que, los morteros con arena de vidrio absorben menos agua comparado con los morteros de arena de río. La mezcla OPC pasó de 14,16% a 13,61% con una diferencia de 0,55% esto puede deberse a que el vidrio tiene una superficie más lisa, además la partícula es más fina, tapa poros, y presenta a su vez menor absorción de agua que la arena (ver resultados de Tabla 7), lo que dificulta la entrada de agua. La mezcla OPC+RL pasó de 14,38% con arena de río a 13,71% con arena de vidrio, disminuyó 0,67%. La mezcla OPC+VIDRIO cambió de 15,47% a 12,70% bajó 2,76%, aquí el cambio fue más significativo. La mezcla OPC+CV se mantuvo prácticamente igual. En mezclas activadas alcalinamente la absorción se redujo de 14% a 12,70% (OPC+AA+CV) disminuyendo un 1,3%; y de 11,45% a 10,80% para OPC+AA+RL disminuyendo un 0,65%; posiblemente atribuido a la reacción entre partículas de vidrio de refuerzo con el activador alcalino, lo cual densifica la zona de interfaz pasta-partícula agregado (Henao Ríos et al., 2023).

Comparando el volumen de poros, en general se aprecia una reducción al incorporar la arena de vidrio, sin embargo, esta reducción fue más significativa en los morteros convencionales basados en OPC, alcanzando hasta un 4,94% menos comparado a los alcalinamente activados.

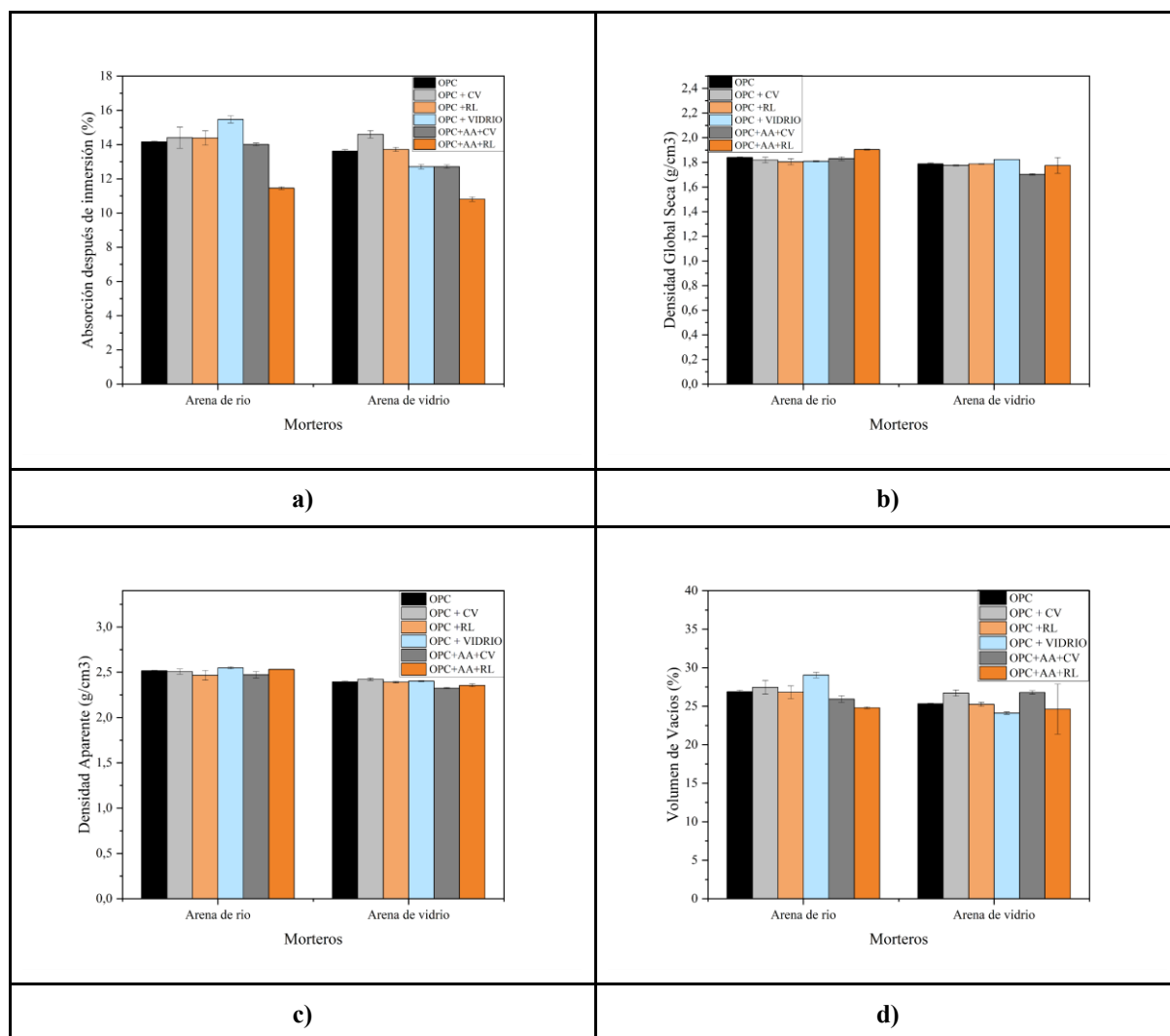


Figura 19. Resultados del ensayo de densidad, absorción y porosidad de morteros de arena de río y vidrio **a)** absorción después de inmersión, **b)** densidad global seca, **c)** densidad aparente, **d)** volumen de vacíos.

### 6.3.3 Resistencia a compresión de morteros

En la Figura 20, se muestran los resultados de resistencia a compresión de morteros para edades de 7, 28 y 90 días de curado. Se encontró que el uso de arena natural de río favorece la obtención de resistencias a compresión más altas en todas las mezclas basadas en OPC, debido a su mejor adherencia y morfología superficial (Valbuena Porras, et al., 2016). Por el contrario, las mezclas con arena de vidrio presentaron resistencias más bajas, tanto en la referencia OPC como en las adiciones de CV, RL y vidrio impalpable.

La mezcla de referencia (OPC) con arena de río alcanzó la mayor resistencia a 90 días (30.91 MPa), mientras que la misma mezcla con arena de vidrio presentó un valor inferior (27.07 MPa), lo que representa una disminución del 12.42%. La adición de ceniza volante (OPC+CV) mostró una resistencia ligeramente inferior a la mezcla de referencia OPC, con una diferencia de 6.7% en arena de río (28.83 MPa) y de 5.8% en arena de vidrio (25.49 MPa), lo que evidencia que la ceniza volante contribuye a la formación de geles C-A-S-H que mejoran la cohesión interna de la mezcla (Lothenbach et al., 2011). Respecto a la mezcla con residuo de ladrillo (OPC+RL), las resistencias fueron intermedias, con 25.98 MPa en arena de río y 23.79 MPa en arena de vidrio a 90 días, lo que confirma el aporte puzolánico del

residuo, aunque con menos eficiencia que la ceniza volante. Por otra parte, la adición de vidrio impalpable en la mezcla (OPC+VIDRIO) también mostró valores intermedios, alcanzando 21.19 MPa en arena de río y 21.39 MPa en arena de vidrio a 90 días.

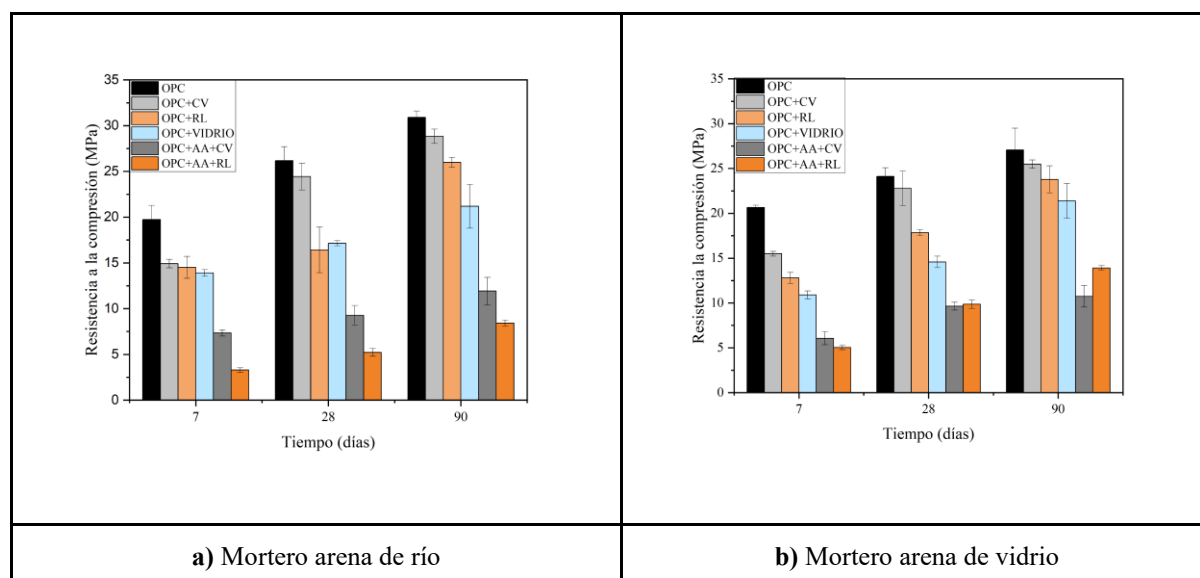


Figura 20. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de curado para los morteros.

Las mezclas activadas alcalinamente (OPC+AA+CV y OPC+AA+RL) presentaron las resistencias más bajas. La mezcla OPC+AA+CV registró 11.92 MPa de arena de río y 10.74 MPa con arena de vidrio, mientras que OPC+AA+RL alcanzó 8.43 MPa en arena de río y 13.91 MPa arena de vidrio a los 90 días. En los morteros geopoliméricos con residuo de ladrillo, la arena de vidrio tuvo un efecto positivo, ya que la resistencia fue un 65% mayor que con arena de río, lo que sugiere una mejor compatibilidad entre el residuo y la sílice amorfa del vidrio bajo condiciones de activación alcalina (Provis & Van Deventer, 2014).

### 6.3.4 Succión capilar de los morteros

Para el ensayo de succión capilar fueron seleccionadas las mezclas de morteros con ceniza volante tanto la basada en OPC (OPC+CV) como la activada alcalinamente (OPC+AA+CV), y la selección se realizó considerando que fueron los morteros que presentaron más alta resistencia a compresión a edad de 28 días de curado. En la (Figura 21), se muestran los resultados obtenidos en el ensayo. Se distingue que todas las mezclas evaluadas tuvieron una tasa de absorción inicial, la cual logra estabilizarse en la primera semana, y después de aproximadamente  $800 \text{ S}^{1/2}$  se encuentra que las mezclas se saturan y estabilizan.

Las mezclas álcali activadas (OPC+AA+CV) tienen aproximadamente similar tasa de absorción inicial que la mezcla de referencia OPC, indistintamente del tipo de arena utilizada, por el contrario, las mezclas adicionadas OPC+CV presentaron el menor coeficiente de absorción de agua por capilaridad. Sin embargo, las porosidades efectivas fueron menores en las mezclas que contienen CV, tanto convencional como activada, lo cual puede indicar un menor tamaño de poro o una mayor tortuosidad comparada a la mezcla OPC.

La mezcla OPC con arena de río fue la que más agua absorbe, alcanzando aproximadamente 16,7 mm hacia los 2600 s<sup>1/2</sup>, posiblemente asociada a la mayor porosidad efectiva (Tabla 9) de esta mezcla, es importante recordar que esta mezcla también tenía altos valores de vacíos (26,88 %) y absorción (14,16 %).

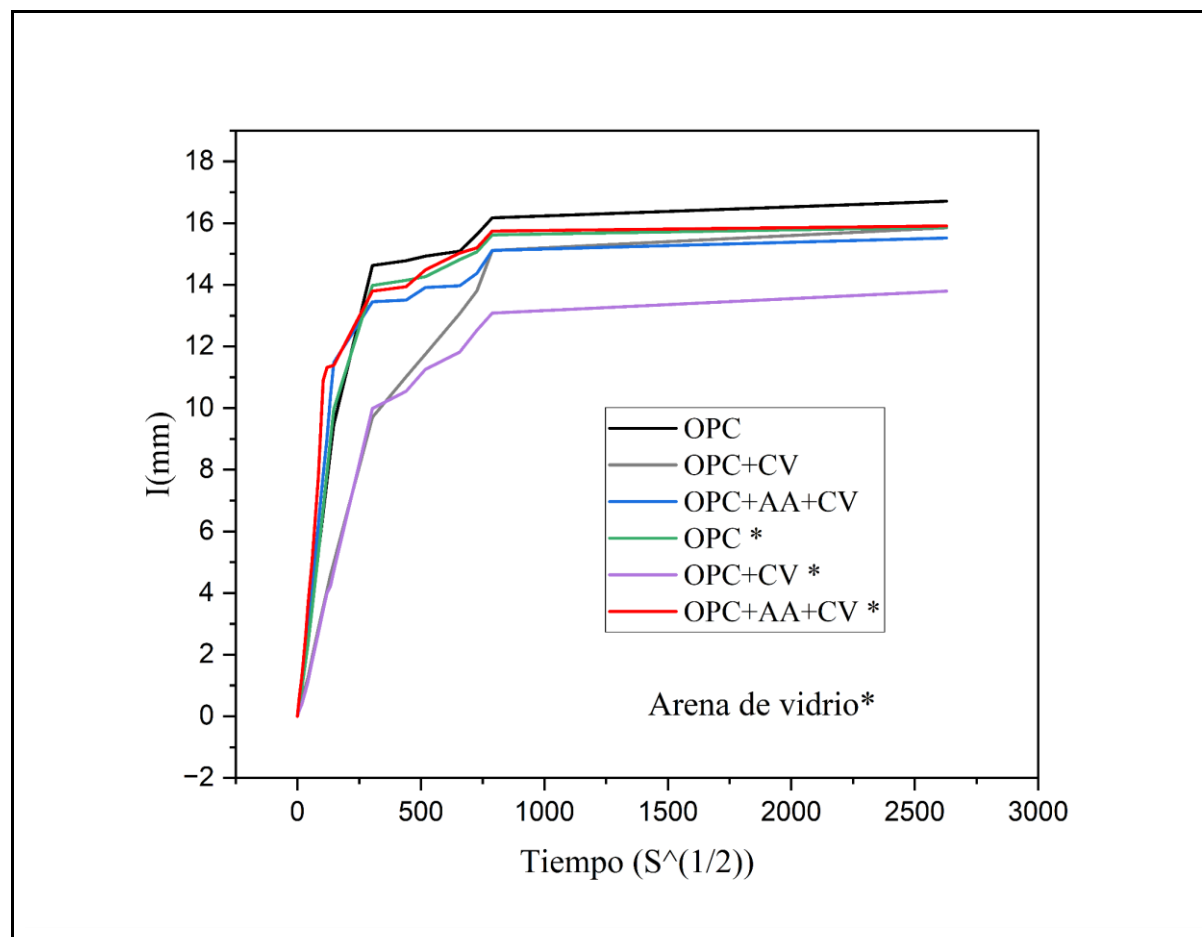


Figura 21. Curva ensayo de succión capilar en morteros absorción vs tiempo.

Tabla 9. Resultados del ensayo de succión capilar.

|                 | Mortero    | Coefficiente de absorción capilar K (kg.m <sup>2</sup> . s <sup>1/2</sup> ) | Porosidad efectiva e (%) | Resistencia a la penetración de agua m (s/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------|
| Arena de río    | OPC        | 0,057                                                                       | 3,45E+00                 | 3,62E+05                                                   |
|                 | OPC-CV     | 0,037                                                                       | 2,20E+00                 | 3,62E+05                                                   |
|                 | OPC+AA+CV  | 0,079                                                                       | 2,29E+00                 | 8,47E+04                                                   |
| Arena de vidrio | OPC*       | 0,070                                                                       | 4,27E+00                 | 3,67E+05                                                   |
|                 | OPC-CV*    | 0,035                                                                       | 2,10E+00                 | 3,67E+05                                                   |
|                 | OPC+AA+CV* | 0,088                                                                       | 2,59E+00                 | 8,59E+04                                                   |

En la mezcla OPC+CV con arena de río, la absorción alcanzó 15,85 mm. La mezcla geopolimérica OPC+AA+CV tuvo la menor absorción total, estabilizándose alrededor de 15,5 mm, coincidiendo con lo que se vio en el ensayo de densidad, absorción y porosidad donde esta mezcla presentó una menor absorción (14 %) y menor densidad aparente (2,47 g/cm<sup>3</sup>) y un volumen de vacíos de 25,92% lo que indica que el material presenta más compacidad y densificación; así mismo tuvo la mayor resistencia a

la penetración de agua por capilaridad.

### 6.3.5 Durabilidad de morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

#### Ensayo de pérdida de peso

En la Figura 22, se presentan los resultados de la variación de peso en morteros sumergidos en ácido acético a edades de 28, 90 y 120 días.

En los morteros con arena de río (Figura 22). Todas las mezclas ganaron ligeramente peso a los 28 días, con variaciones entre +1,2 % y +1.5 %, lo cual sugiere absorción de la solución ácida, para los 90 días, se evidencia una disminución en el porcentaje de peso ganado para todas las mezclas. A los 120 días de exposición, a excepción del mortero OPC y OPC+RL, todos los demás morteros mostraron una ligera pérdida de masa de hasta 0.2%.

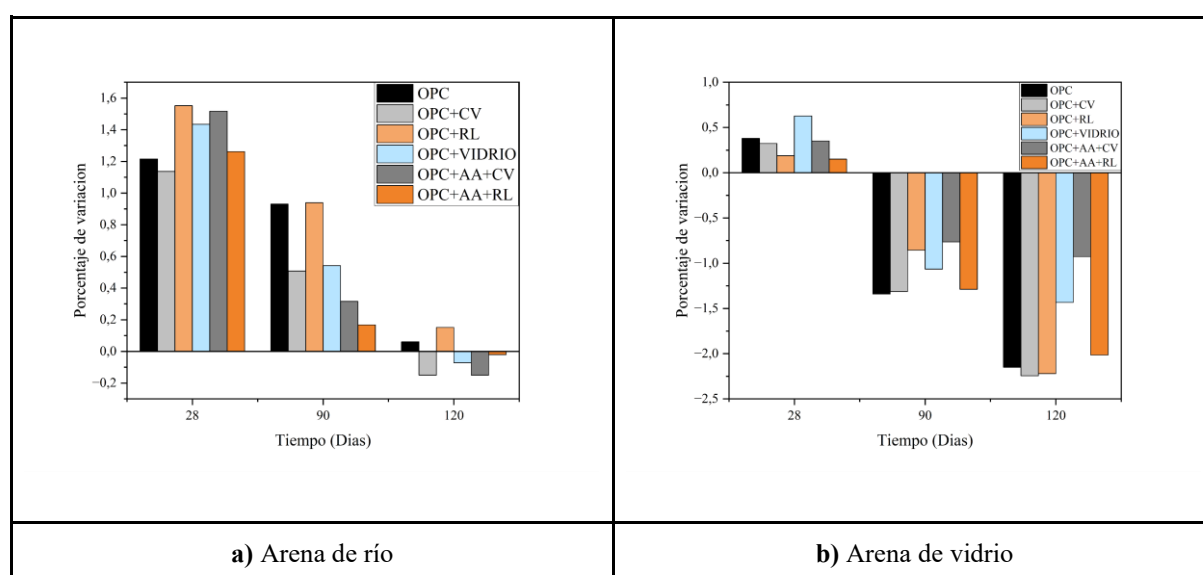


Figura 22. Resultados de variación de peso de los morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).

En los morteros de arena de vidrio sumergidos en ácido acético, para 28 días, han mostrado una ligera ganancia de peso (0.5%), sin embargo, desde los 90 días, se presenta pérdida de peso 0.8%-1.4%. El proceso de deterioro comienza con la disolución de la portlandita de la matriz de cemento (Berger F et al., 2022). En particular, el mortero de referencia OPC muestra una mayor pérdida de masa en comparación con otras mezclas, lo que indica una menor resistencia química de éste.

Finalmente, a los 120 días, la pérdida de peso es mayor con pérdidas de aproximadamente de -2.3% en las mezclas de OPC+CV y OPC+RL. La mezcla álcali activada OPC+AA+CV sigue mostrando una mejor estabilidad, con menores pérdidas de peso, lo que sugiere una mejor resistencia del mortero en ambientes ácidos.

#### Resistencia a compresión de morteros expuestos a ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

La Figura 23, presenta los resultados de resistencia a compresión a los 28, 90 y 120 días de exposición de los morteros elaborados con arena de río y vidrio, sumergidos en ácido acético. Es fundamental destacar que, antes de la inmersión, estas muestras fueron curadas en una piscina con cal para las

mezclas basadas en OPC, mientras que las mezclas activadas alcalinamente se mantuvieron bajo condiciones de cámara húmeda durante 28 días. La resistencia alcanzada a esta edad se representa como la edad 0 en las gráficas, es decir, momento en el cual inicia la exposición al ácido.

Los morteros elaborados con arena natural y de vidrio mostraron comportamientos mecánicos diferentes bajo exposición al ácido acético. Al comparar la resistencia inicial con la reportada a 120 días de exposición, los morteros OPC/arena natural experimentaron una pérdida resistente del 24.45% (de 26.18 MPa a 19.78 MPa), fenómeno atribuido a la lixiviación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  de la portlandita  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  y la formación de acetato de calcio soluble, que incrementa la porosidad y debilita la matriz (Allahverdi & Skvara, 2000). La adición de ceniza volante (OPC+CV) redujo la pérdida al 18.62% (de 24.44 MPa a 19.89 MPa), posiblemente por la formación de geles de C-A-S-H que contribuyen a taponamiento de poros y limitan la penetración del ácido (Lothenbach et al., 2011). En general, todas las mezclas basadas en OPC con adición RL y RV tuvieron una pérdida de resistencia en orden similar. Sin embargo, las mezclas álcali activadas (OPC+AA+CV y OPC+AA+RL) mostraron una ganancia del 39.52% y 18.01% respectivamente a edad de 120 días, resultado vinculado a la formación de fases geopoliméricas que sellan microgrietas y neutralizan el ácido (Fernández-Jiménez et al, 1999).

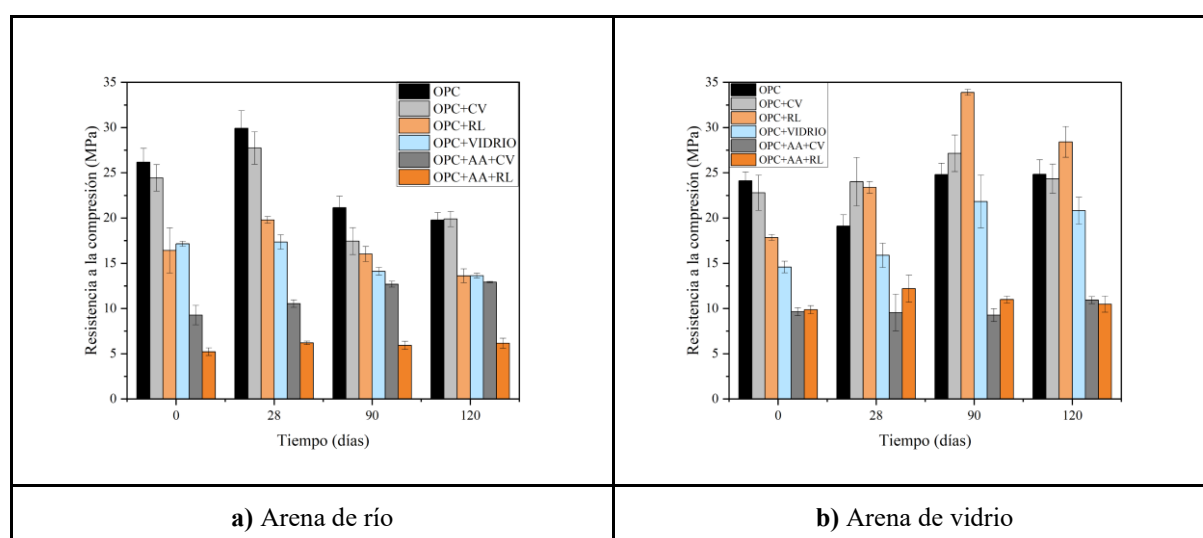


Figura 23. Resistencia a compresión residual para edad de 0, 28, 90 y 120 días para morteros sumergidos en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).

Por otro lado, los morteros con arena de vidrio tienden a ganar resistencia en la medida que se aumenta el tiempo de exposición, incluso en la mezcla de referencia OPC, a medida que transcurre el tiempo de exposición hasta los 120 días de exposición se aprecia un incremento del 2.9% (de 24.12 MPa a 24.82 MPa), lo que sugiere que probablemente las partículas más finas del vidrio ( $\text{SiO}_2$  amorfo) reaccionan como material puzolánico generando silicatos estables que compensan la potencial descalcificación (Izquierdo et al., 2015). Es de destacar, la mezcla OPC+RL con un incremento del 59.2% (17.85 MPa a 28.42 MPa). En general, todas las mezclas adicionadas muestran un buen desempeño. Las mezclas activadas alcalinamente, como OPC+AA+CV (+13.4%) y OPC+AA+RL (+6.3%), mostraron ganancias moderadas. El vidrio, al ser un material vítreo, posee una estructura química que reacciona favorablemente en ambientes ácidos. Esto sucede porque el ácido acético extrae los componentes más solubles del vidrio (como los álcalis), concentrando la sílice en la superficie, lo que da lugar a la formación de un gel de sílice hidratada. Este gel actúa rellenando los poros y microfisuras, reforzando la matriz del mortero y mejorando su cohesión interna, lo que incrementa la resistencia y durabilidad del material frente a ataques ácidos (Du & Tan, 2014). En este contexto, se ha observado que los

morteros elaborados con arena de vidrio presentan una mayor resistencia al ataque del ácido acético en todas las mezclas evaluadas. Esto resalta la importancia de seleccionar adecuadamente los materiales complementarios para optimizar tanto el desempeño mecánico como la durabilidad del mortero en condiciones agresivas. Además, la interacción entre este tipo de arena y los materiales puzolánicos complementarios es fundamental para mejorar las propiedades del mortero, es decir, una formulación adecuada puede dar lugar a mezclas más resistentes y sostenibles.

El seguimiento fotográfico de los morteros expuestos en ácido acético es mostrado en la Figura 24 y 25.

| Mezcla           | 28 días en ácido acético                                                            | 120 días en ácido acético                                                            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| a)<br>OPC        |    |    |
| b)<br>OPC+CV     |   |   |
| c)<br>OPC+RL     |  |  |
| d)<br>OPC+VIDRIO |  |  |
| e)<br>OPC+AA+CV  |  |  |

|                                 |                                                                                   |                                                                                    |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>f)</p> <p>OPC+AA+<br/>RL</p> |  |  |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|

Figura 24. Apariencia de morteros con arena de río expuestos en ácido acético durante 28 y 120 días. (Fuente: Elaboración propia)

| Mezcla                           | 28 días en ácido acético                                                            | 120 días en ácido acético                                                            |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a)</p> <p>OPC</p>             |   |   |
| <p>b)</p> <p>OPC+CV</p>          |  |  |
| <p>c)</p> <p>OPC+RL</p>          |  |  |
| <p>d)</p> <p>OPC+VIDR<br/>IO</p> |  |  |

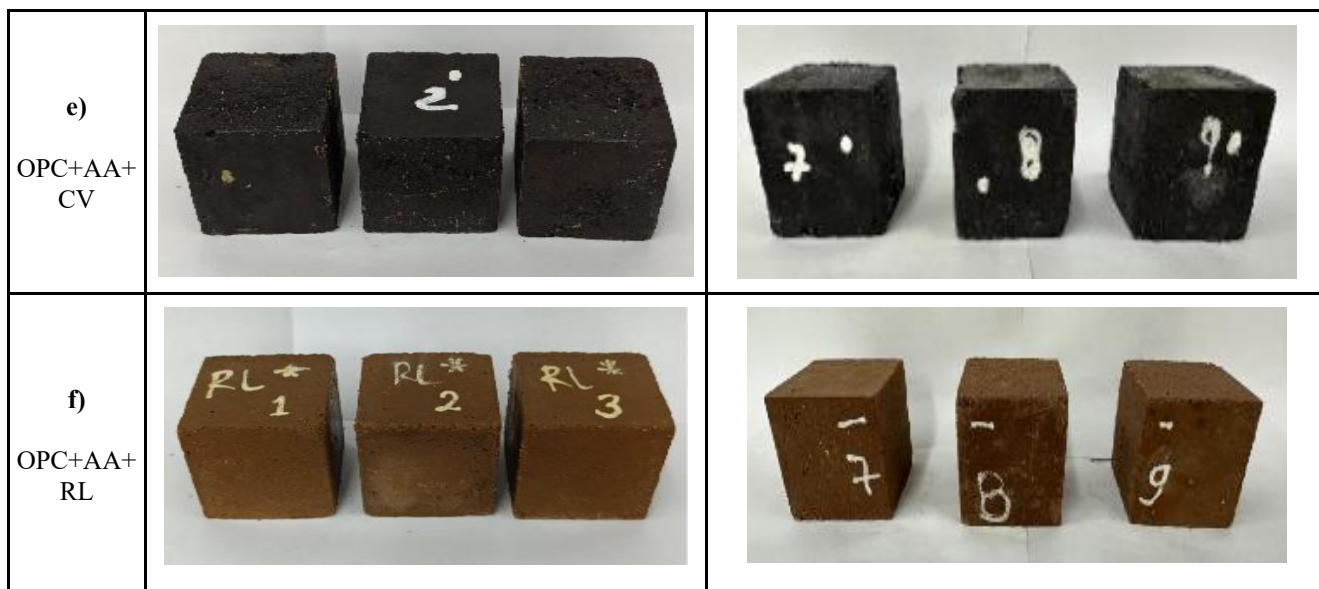


Figura 25. Apariencia de morteros con arena de vidrio expuestos en ácido acético durante 28 y 120 días.  
(Fuente: Elaboración propia)

La inspección visual de los morteros sumergidos en ácido acético muestra un deterioro notable en los morteros con arena de río y arena de vidrio. En los morteros con arena de río se observó una mayor pérdida de material superficial, la presencia de fisuras y un mayor desgaste en comparación con los elaborados con arena de vidrio. En estos últimos, aunque se presentó cierto desmoronamiento superficial de la arena de vidrio, el daño fue menor. La arena de río tiene partículas redondeadas y variabilidad en forma y tamaño debido a su origen natural, lo que genera discontinuidades en la red cementante, en cambio, la arena de vidrio ofrece partículas con bordes rectos y caras planas que promueven una mejor adherencia mecánica con la matriz. Esto coincide con los resultados presentados en la Figura 23, donde las mezclas con arena de vidrio registraron menores pérdidas de resistencia mecánica frente al ataque ácido, lo que confirma una mayor estabilidad química, por lo tanto, una mejor durabilidad de este tipo de morteros expuestos en ácido acético.

### 6.3.6 Durabilidad de morteros sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ )

En la Figura 26, se presentan los resultados de la variación de peso en morteros de arena de río y vidrio sumergidos en sulfato de magnesio a edades de 28, 90 y 120 días.

En los morteros producidos con arena natural sumergidos en sulfato de magnesio se observa que a los 28 días, la mayoría de las mezclas presentan valores de ganancia cercanos a cero, lo que indica que no han experimentado una ganancia de peso significativa. Sin embargo, algunas mezclas como OPC+VIDRIO y OPC+RL, ya muestran un ligero aumento en la variación, lo que sugiere que estos materiales están comenzando a absorber posiblemente la solución de sulfato en su estructura. A los 90 días, se observa un incremento más evidente en la ganancia de peso en todas las mezclas. El mortero OPC y las mezclas con vidrio presentan un aumento significativo en el porcentaje de variación de peso, lo que indica que están absorbiendo mayor cantidad de sulfato de magnesio. Esta absorción puede estar relacionada con la formación de productos de reacción, como la brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) (De Souza et al., 2020), que generan acumulación de material al interior del mortero y por lo tanto aumenta su masa. No obstante, la mezcla geopolimérica OPC+AA+RL muestran una menor ganancia de peso, lo que indica mejor estabilidad del material en este ambiente agresivo. A los 90 días, el aumento de peso es más notorio en todas las mezclas, alcanzando valores de 1.5% a 2.2% en algunos casos. En cementos adicionados de OPC la porosidad aumenta, facilitando la penetración de sulfatos de magnesio, lo que

acelera la degradación (Provis & Bernal,2014). Las mezclas OPC+RL y OPC+VIDRIO presentan los mayores aumentos, lo que sugiere que estos materiales son más vulnerables al ataque de sulfatos. En cambio, las mezclas álcali activadas con OPC+AA+RL y OPC+AA+CV muestran un menor incremento en el peso, indicando que este aditivo ayuda a reducir la absorción de sulfatos y mejora la estabilidad del material.

A los 120 días, la ganancia de peso es más pronunciada, alcanzando valores de hasta 4-5% en algunas mezclas. Las mezclas que más ganaron peso fueron OPC, OPC+VIDRIO y OPC+CV. Esta alta ganancia de peso indica que los sulfatos se han depositado en los poros del mortero, aumentando su contenido de humedad y densidad, lo que a largo plazo podría generar fisuración interna o cambios en la resistencia mecánica. En cambio, las mezclas con OPC+AA+RL y OPC+AA+CV presentan la menor ganancia de peso, lo cual se podría explicar por ser la mezcla con la menor porosidad presentada.

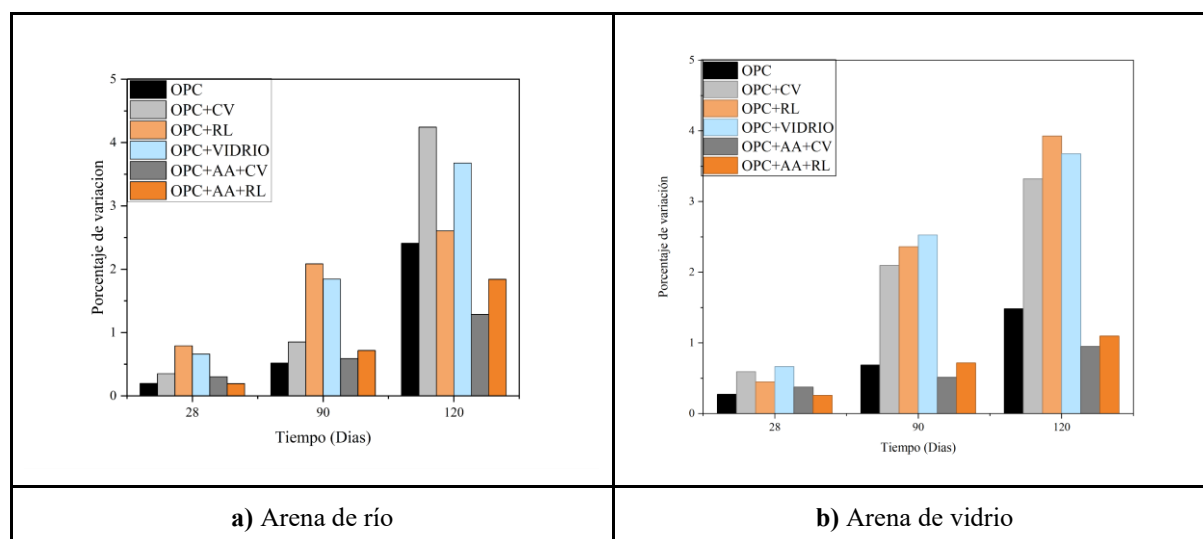


Figura 26. Resultados de pérdida de peso de morteros de arena de río y vidrio sumergidas en sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ).

Por otro lado, en los morteros con arena de vidrio se observó que, a los 28 días, la mayoría de las mezclas presentan variaciones cercanas al 0,5%, lo que indica una ganancia de peso atribuida a la absorción inicial de sulfatos y a la formación de productos secundarios en la superficie del material. En mezclas como OPC+CV y OPC+VIDRIO, este incremento es mayor, lo cual sugiere una mayor interacción temprana con los sulfatos disponibles. Sin embargo, debe destacarse que la incorporación de ceniza volante con un activador alcalino favorece el desarrollo de una microestructura más densa y compacta, gracias a la formación de geles N-A-S-H (Provis & Van Deventer,2014). Esta densificación de la matriz, aunque no impide la ganancia inicial de peso, sí contribuye a reducir la penetración de iones agresivos en edades avanzadas, mejorando así la resistencia química de los morteros frente al ataque por sulfatos de magnesio. A los 120 días, la ganancia de peso es aún más pronunciada, alcanzando valores cercanos al 4% en algunas combinaciones, especialmente en OPC+RL y OPC+VIDRIO. Esto indica que los sulfatos han penetrado profundamente en la estructura del mortero, aumentando su contenido de humedad y favoreciendo la acumulación de productos expansivos. Este fenómeno podría generar fisuración interna y afectar la resistencia mecánica del material a largo plazo. En contraste, las mezclas con OPC+AA+RL, OPC+AA+CV presentan la menor ganancia de peso, lo que confirma un comportamiento estable frente a la acción de los sulfatos.

## Resistencia a compresión en morteros expuestos a sulfato de Mg

En la (Figura 27), se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos a los 28, 90 y 120 días de exposición de los morteros sumergidos.

Comparando las edades de 28 y 120 días, en los morteros con arena natural, la mezcla OPC registró una pérdida del 16.23%, atribuible a la formación de etringita y yeso por la reacción del  $\text{MgSO}_4$  con los hidratos de calcio (Mehta & Monteiro, 2014). En OPC+CV, la pérdida fue del 43.70%, mientras OPC+RL mostró una pérdida de 1.46%, por el contrario, la mezcla OPC+VIDRIO presentó una ganancia del 39.67%, esto puede atribuirse a una mayor reactividad del vidrio en medios alcalinos que favorece la formación de geles secundarios (C-S-H), que densifican la matriz del mortero mejorando así la cohesión interna y la durabilidad del material (Izquierdo, et al., 2016). Las mezclas activadas alcalinamente, OPC+AA+CV y OPC+AA+RL, mostraron ganancias del +44.60% y +39.27%, respectivamente, lo que indica que el activador alcalino empleado promovió la formación de geles N-A-S-H o C-A-S-H estables frente al ataque por sulfatos (Palomo et al., 1999).

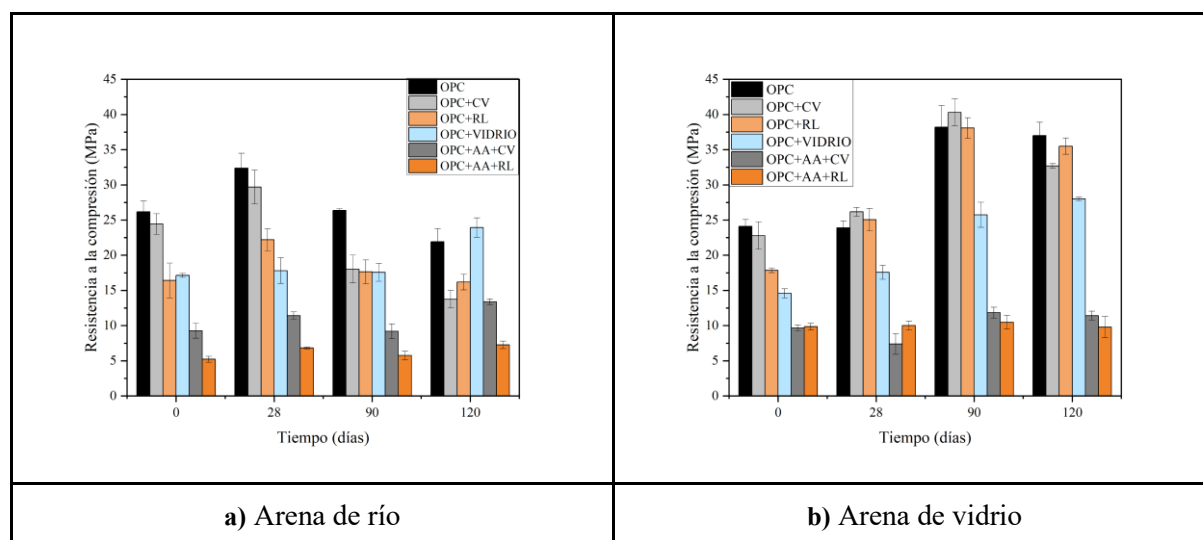


Figura 27. Resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de morteros sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).

En morteros con arena de vidrio, todas las mezclas presentaron ganancias, excepto OPC+AA+RL, que registró una leve pérdida del 0,81%. La mezcla OPC (referencia) alcanzó un 53,46 %, ya que el vidrio, como agregado fino y precursor parcial, reduce la permeabilidad y retrasa la penetración de sulfatos. En presencia de  $\text{MgSO}_4$ , se ha reportado la formación de brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), los cuales pueden generar un efecto de densificación inicial de la matriz, aunque a largo plazo contribuyen al deterioro (Bakharev et al., 2002). OPC+CV y OPC+RL tuvieron ganancias del 43,50% y 98,82%, respectivamente y OPC+VIDRIO mostró una ganancia del 91,97%, corroborando que el vidrio, como adición o complemento, mejora la resistencia química al actuar como reserva de sílice reactiva (García-Lodeiro et al., 2016). La mezcla activada alcalinamente OPC+AA+CV, con una ganancia del 18,36 %, esto se atribuye a la riqueza en sílice y alúmina amorfas de la ceniza volante, que facilita la disolución en el medio  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y la formación de geles N-A-S-H/C-A-S-H densos (Palomo et al., 1999). En contraste, el residuo de ladrillo contiene mayor proporción de fases cristalinas (cuarzo, feldespatos), lo que limita su reactividad y deja una microestructura más porosa y vulnerable. Su pérdida de resistencia no implica la formación de productos expansivos, sino que se relaciona con la limitada reactividad del precursor, lo cual deja la matriz menos densificada y más expuesta al ataque de sulfatos.

Al igual que en el caso anterior, los resultados de los morteros con arena de vidrio muestran una ventaja significativa con respecto a los morteros con arena natural. Estos resultados resaltan que el uso de arena de vidrio no solo mejora el desempeño mecánico y químico del mortero, sino que también promueve la sostenibilidad al incorporar residuos reciclados en materiales de construcción avanzados.

Por otro lado, una hipótesis respecto a los depósitos blancos en los envases de cada probeta sumergida en  $\text{MgSO}_4$  podría corresponder a yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) o brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), ya que estos son productos de la interacción entre soluciones con sulfatos y materiales cementantes. Dichos compuestos son solubles y frágiles, por lo que tienden a desintegrarse fácilmente. Al exponer morteros basados en OPC a la solución de sulfato de magnesio, se forma una doble capa superficial de brucita (se genera por la sustitución del calcio por magnesio) y yeso (resulta de la precipitación del sulfato con calcio) y estos compuestos se pueden encontrar sobre la superficie de las probetas o en el entorno de la muestra (Bonen & Cohen, 1992). El yeso se forma por la reacción entre los iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente en la matriz cementante, lo que genera un aumento de volumen que puede causar microfisuras y debilitamiento estructural. Por otro lado, la brucita es un producto típico del intercambio iónico entre el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) del sulfato de magnesio y el calcio en la pasta de cemento, lo que también puede contribuir a la descalcificación y pérdida de cohesión en el material (Izquierdo et al., 2016).

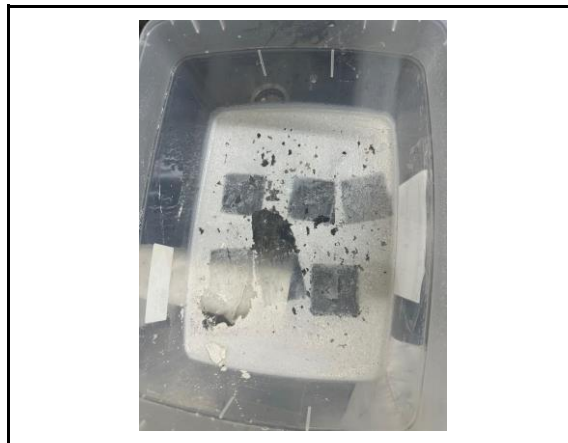


Figura 28. Muestra de residuos en envase plástico. (Fuente: Elaboración propia)

| Mezcla    | 28 días en sulfato de magnesio                                                      | 120 días en sulfato de magnesio                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| a)<br>OPC |  |  |

|                         |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>b)</b><br>OPC+CV     |    |    |
| <b>c)</b><br>OPC+RL     |    |    |
| <b>d)</b><br>OPC+VIDRIO |   |   |
| <b>e)</b><br>OPC+AA+CV  |  |  |
| <b>f)</b><br>OPC+AA+RL  |  |  |

Figura 29. Apariencia de morteros con arena de río expuestos en sulfato de magnesio durante 28 y 120 días.  
 (Fuente: Elaboración propia)

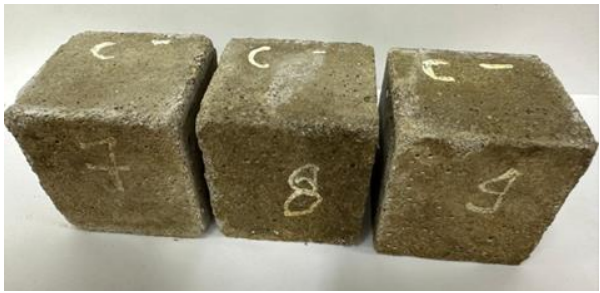
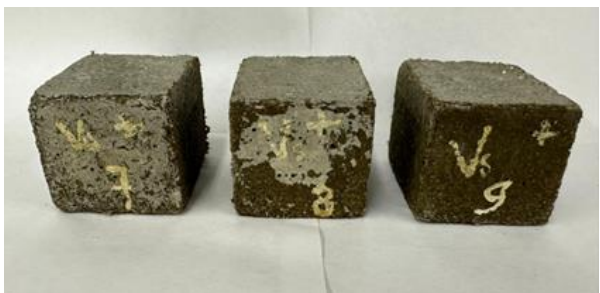
| Mezcla           | 28 días en sulfato de magnesio                                                      | 120 días en sulfato de magnesio                                                      |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| a)<br>OPC        |    |    |
| b)<br>OPC+CV     |    |    |
| c)<br>OPC+RL     |   |   |
| d)<br>OPC+VIDRIO |  |  |
| e)<br>OPC+AA+CV  |  |  |



Figura 30. Apariencia de morteros con arena de vidrio expuestos en sulfato de magnesio durante 28 y 120 días.  
(Fuente: Elaboración propia)

Se encontró que los morteros de arena de vidrio presentan una mejora notable en comparación con los morteros elaborados con arena de río. Debido a la composición del árido agregado a la mezcla, esta compactación limita la penetración de la solución de sulfato de magnesio, reduciendo la formación de productos expansivos y el desarrollo de microgrietas. En contraste, la variabilidad en la forma y el tamaño de las partículas de arena de río debido a su origen natural genera discontinuidades en la red cementante, facilitando la entrada de iones agresivos y propiciando una mayor expansión. De esta manera, se concluye que la utilización de arena de vidrio en los morteros conduce a una respuesta mecánica más fuerte y en una mayor estabilidad dimensional a lo largo del tiempo, aspectos cruciales para la durabilidad.

#### Variación volumétrica de morteros sumergidos en sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ )

La Figura 31, muestra los resultados de expansión de las vigas de mortero a 7, 28 y 90 días de exposición en sulfato de magnesio.

Los resultados de expansión en vigas sumergidas en sulfato de magnesio en el mortero 100% OPC de arena natural mostró una expansión moderada, mientras que su equivalente con arena de vidrio tuvo valores ligeramente inferiores. En la mezcla OPC+CV, la acción puzolánica de la ceniza redujo la expansión en ambos tipos de mortero, sin embargo, la mezcla con arena de vidrio resultó en una matriz cementante con menor porosidad, lo que permite la reducción de la expansión (Bernal et al., 2011). Por otro lado, la mezcla OPC+RL presentó valores de expansión superiores en los morteros con arena de río en comparación con los de arena de vidrio, lo que sugiere que la interacción entre el residuo de ladrillo y el árido convencional genera una red interna menos homogénea (Izquierdo et al., 2016). La incorporación de vidrio impalpable en la mezcla OPC+VIDRIO dio lugar a expansiones menores en los dos tipos de morteros, siendo notable en los morteros con arena de vidrio, donde el complemento (vidrio impalpable) actúa como un material puzolánico que refina la estructura del gel cementante (Schwarz & Neithalath, 2008).

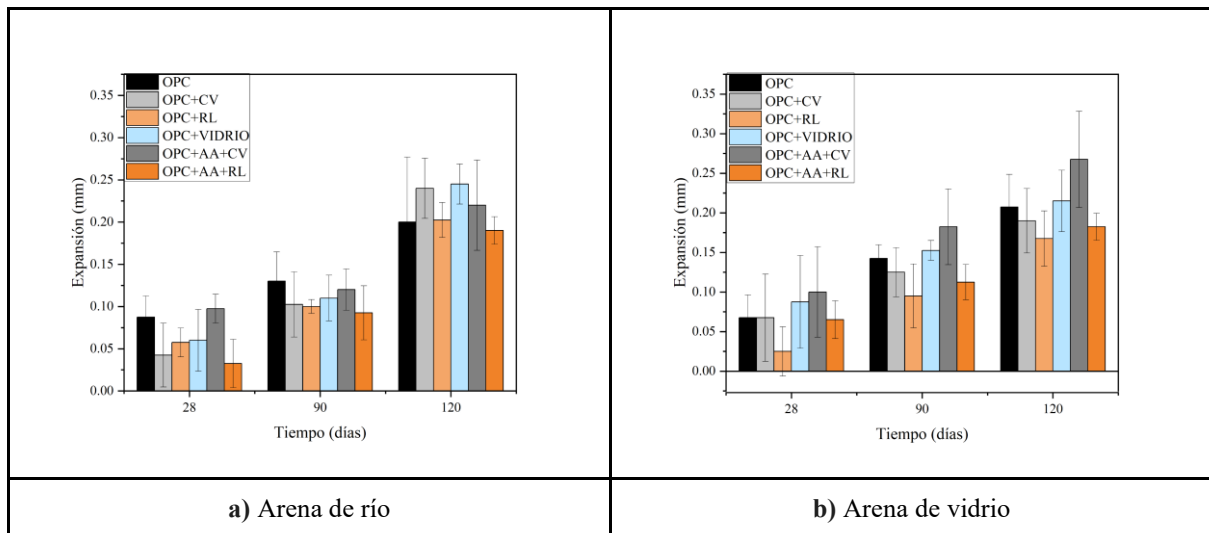


Figura 31. Resultados de expansión de vigas de arena de río y vidrio a 28, 90 y 120 días de exposición a sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ).

Finalmente, luego de 120 días sumergidas en  $MgSO_4$  los morteros con el residuo RL tanto adición de OPC como en mezcla geopolimérica mostraron los menores valores de expansión en ambos tipos de mortero, en particular, la formulación OPC+RL destacó al presentar un mejor desempeño en el mortero con arena de vidrio.



Figura 32. Muestra de expansión en vigas y toma de medidas. (Fuente: Elaboración propia)

## 6.4 Evaluación térmica de morteros a alta temperatura

### 6.4.1 Resistencia mecánica después de exposición en horno a 800°C

Para las pruebas térmicas, se seleccionaron los morteros OPC, OPC+CV, OPC+Vidrio y OPC+AA+CV, con arena de río y con arena de vidrio. La elección se basó en la estabilidad que demostraron estos morteros en las pruebas de resistencia mecánica a los 28 días, donde el tipo de arena empleado en los morteros no influyó en los resultados

Luego de exposición a 800°C, todas las mezclas tuvieron pérdidas de volumen, lo que se atribuye a la deshidratación de los productos de hidratación y al colapso de la estructura interna de la matriz cementante (Alonso & Fernández, 2004). De igual manera en los morteros con arena de vidrio se

observan reducciones en el volumen, sin embargo, destaca la mezcla OPC+AA+CV, la cual presentó una ganancia de volumen del 75.31%. Este comportamiento atípico podría explicarse por la formación transitoria de silicatos sódicos fundentes ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) y carbonatos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) derivados de la interacción del activador alcalino con la ceniza volante y el vidrio. La formación de estas fases, junto con la liberación de agua en los geles, genera tensiones internas y transformaciones que provocan un aumento de volumen (Kong & Sanjayan, 2010).

Debido al tipo de árido presente y complemento del 10% de vidrio impalpable, esta sílice amorfa reacciona con NaOH a altas temperaturas ( $>400^\circ\text{C}$ ), intensificando la producción de  $\text{H}_2$  y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Además, su coeficiente de expansión térmica del gel N-A-S-H genera tensiones internas que agrietan la matriz (Torres-Carrasco & Puertas, 2017). En caso contrario a los morteros de arena de río ya que puede contener cuarzo cristalino, lo cual es menos reactivo con NaOH.

Se destaca la mezcla OPC+AA+CV de arena de vidrio por su cambio volumétrico:

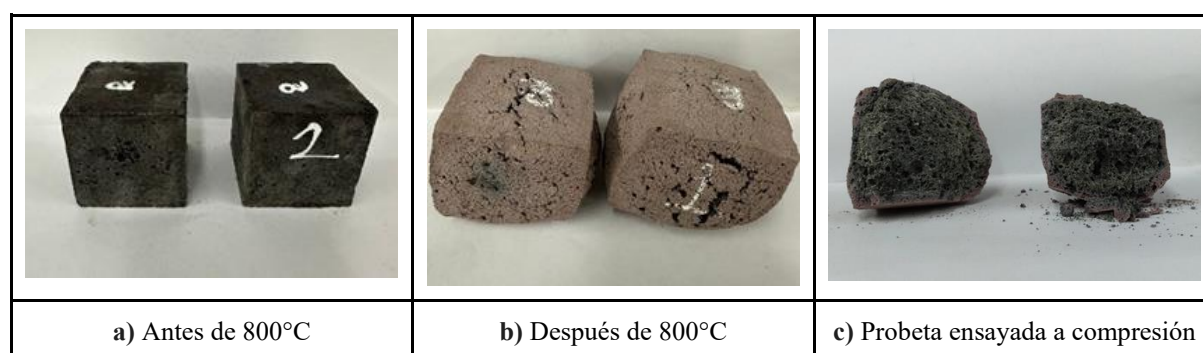


Figura 33. Morteros OPC+AA+CV antes y después de exponerse a  $800^\circ\text{C}$ . (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados de resistencia a la compresión tras la exposición a  $800^\circ\text{C}$  (Figura 34) para las mezclas con arena de río mostraron mayores resistencias en comparación con las mezclas con arena de vidrio. Para la mezcla de referencia (OPC), la resistencia residual fue mayor en morteros con arena de río (12.95 MPa) que en aquellos con arena de vidrio (6.82 MPa). Esto posiblemente se debe a que la arena de río es un material más estable ante altas temperaturas, mientras que los álcalis liberados por el vidrio, a altas temperaturas genera discontinuidades que debilitan la estructura (Li, Qian & Sun, 2004).

El mortero OPC+Vidrio presentó las menores resistencias, 5.65 MPa con arena de río y 5.02 MPa con arena de vidrio, lo que coincide con estudios que señalan que el vidrio impalpable, aunque reduce la permeabilidad, puede actuar como punto de concentración de esfuerzos térmicos debido a su expansión diferencial respecto a la pasta de cemento generando tensiones internas (Zhang, Li, & Ranade, 2014).

Por otro lado, la mezcla OPC+CV con arena de vidrio mostró una resistencia superior (7.65 MPa) frente a la mezcla con arena de río (7.08 MPa).

Para las mezclas de geopolímeros, se destaca la mezcla OPC+AA+CV ( $16.01 \pm 0.35$  MPa luego de exposición a  $800^\circ\text{C}$ ), en donde la matriz geopolimérica es termoestable con ayuda de la arena de río, y capaz de preservar la integridad estructural a altas temperaturas (Provis & Bernal, 2014). El tratamiento térmico puede favorecer la formación y densificación de geles, la ceniza volante rica en sílice y alúmina permite la formación del gel N-A-S-H, mientras que el OPC aporta la formación del gel C-S-H. Al someterse a calor, se promueven reacciones adicionales de polimerización y sinterización, mejorando la microestructura y reduciendo la porosidad, lo que se traduce en un incremento significativo de la

resistencia a la compresión (Aziz et al., 2022). Por el contrario, la misma mezcla con arena de vidrio registró una drástica reducción (1.16 MPa), atribuible posiblemente la fusión parcial del vidrio granular, que pudo haber generado porosidad y microfisuras al enfriarse, como ha sido mostrado por otros investigadores (Lu & Poon, 2018).

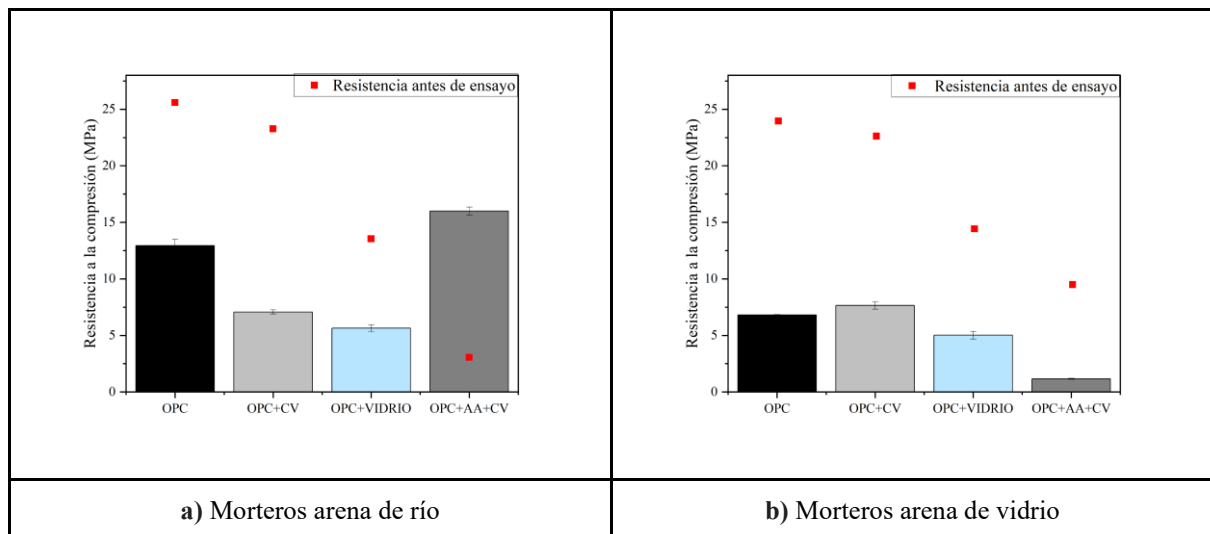


Figura 34. Resistencia a compresión de morteros después de exposición en horno a 800°C.

## 6.5 Fase 4: Validación del potencial de aplicación

### 6.5.1 Prototipo de elementos de enchape

Finalmente fueron elaborados tres prototipos de fachaletas utilizando arena de vidrio las cuales se muestran en la (Figura 35).

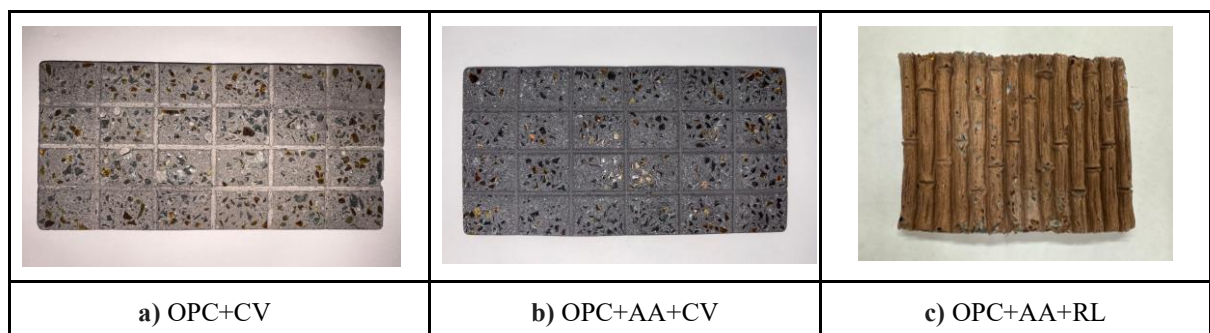


Figura 35. Prototipo de fachaletas con diferentes mezclas. (Fuente: Elaboración propia)

Los morteros con los cuales se elaboraron las fachaletas, fueron probados a flexión y los resultados se muestran en la Figura 36. La mezcla OPC+CV tuvo mayor resistencia a flexión (5.56 MPa), debido a la acción puzolánica de la ceniza volante, que reacciona con la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para formar gel C-S-H adicional, reduciendo la porosidad, lo que se traduce en una matriz más densa. Sin embargo, en las mezclas activadas alcalinamente, la resistencia es baja para ambas mezclas. Esto se explica por la formación de una matriz geopolimérica más rígida y menos dúctil, donde los enlaces aluminosilicatos (N-A-S-H) tienden a tener microfisuras bajo cargas de flexión debido a su capacidad baja de deformación plástica (Provis & Bernal, 2014).

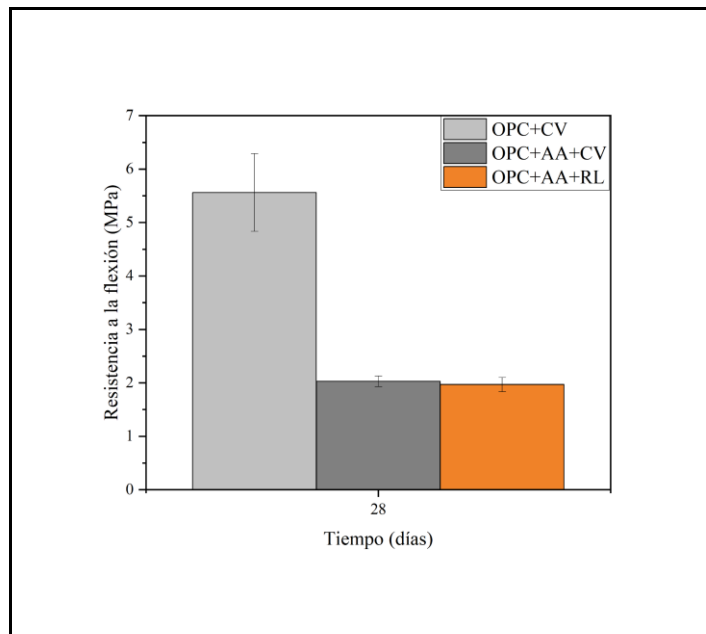


Figura 36. Ensayos de flexión para vigas de arena de vidrio utilizados en la elaboración de fachaletas.

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir lo siguiente:

- Los ensayos de resistencia a compresión revelaron diferencias entre las mezclas con 80% OPC y álcali-activados. En cuanto a las pastas, las mezclas basadas en cemento Portland (OPC) con adiciones del 20% de ceniza volante (CV), residuo de ladrillo (RL) o vidrio reciclado alcanzaron resistencias superiores a 40 MPa a 90 días, destacando OPC+VIDRIO (46.71 MPa) como la mayor resistencia de las pastas basadas en OPC, esto, debido a su reactividad puzolánica. En las pastas álcali activadas (OPC+AA+CV y OPC+AA+RL) mostraron resistencias inferiores (22.36 y 26.92 MPa a 90 días). En cuanto a los morteros con arena de natural y arena de vidrio, la resistencia a compresión fue mayor en morteros con arena de río en la mayoría de los casos a 90 días, en la arena de vidrio mejoró la resistencia especialmente en la mezcla OPC+AA+RL (+65% de resistencia vs. arena de río). En lo que respecta a la prueba de densidad, porosidad y absorción en morteros, la arena de vidrio redujo la absorción de agua comparado con la arena natural. Esta reducción fue más significativa en los morteros convencionales basados en OPC, alcanzando hasta un 4,94% menos comparado a los alcalinamente activados. Como resultado, mejoró la densidad aparente (2.39 g/cm<sup>3</sup> vs. 2.51 g/cm<sup>3</sup> de arena natural) y redujo la porosidad (26,70% en OPC+CV\* vs. 27,45% en arena natural).
- En relación con la durabilidad en ambientes ácido y de sulfato se encontró que los morteros con arena de vidrio mostraron menor deterioro en ácido acético. Las mezclas álcali activadas OPC+AA+CV y OPC+AA+RL registraron ganancias de resistencia residual (+13.38% y +6.29%, respectivamente), debido a la formación de geles N-A-S-H estables que neutralizan el ácido. Se destaca que en los morteros con arena de río exhibieron fisuras y erosión superficial (Figura 24), mientras que los de arena de vidrio mantuvieron integridad (Figura 25). Por otra parte, cuando fueron sumergidos en sulfato de magnesio las mezclas álcali activadas (OPC+AA+CV, OPC+AA+RL) con arena de vidrio tuvieron el menor porcentaje de variación de peso (1% y 1,3% respectivamente) comparadas con las de arena natural. Esto se vinculó a su menor porosidad y formación de fases no expansivas. Por último, en el ensayo de variación volumétrica de morteros sumergidos en sulfato de magnesio destaca la mezcla OPC+RL con arena de vidrio que tuvo la menor expansión a 120 días.
- En los ensayos de succión capilar, las mezclas con CV (convencionales y activadas alcalinamente) redujeron la absorción de agua. OPC+CV mostró el menor coeficiente (0.034 kg/m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup> en arena natural), mientras que OPC+AA+CV con arena de vidrio tuvo la mayor resistencia a la penetración de agua (8.44×10<sup>4</sup> s/m<sup>2</sup>), indicando una matriz más densa. Los resultados del ensayo a alta temperatura (800°C), mostraron que la mezcla álcali activada OPC+AA+CV con arena de río ganó resistencia (+44% vs. resistencia inicial a 28 días de curado) por sinterización de geles, pero con arena de vidrio colapsaron (-90% de resistencia) por fusión del vidrio, lo que pudo haber generado porosidad. Todos los morteros perdieron hasta 19% de masa por deshidratación y se destaca la mezcla OPC+AA+CV, la cual presentó una ganancia de volumen del 75.31%.
- Finalmente, se realizaron los prototipos de fachaleta con arena de vidrio y se realizó ensayo a flexión a las mezclas, destaca la mezcla OPC+CV la cual alcanzó 5.56 MPa de resistencia en

flexión. Las mezclas activadas tuvieron menor resistencia a flexión (menor a 3 MPa) por su matriz rígida y micro fisuración.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allahverdi, A., & Škvára, F. (2000). Acidic corrosion of hydrated cement based materials. *Ceramics-Silikáty*, 44(4), 152–160. [https://www.ceramics-silikaty.cz/2000/pdf/2000\\_04\\_152.pdf](https://www.ceramics-silikaty.cz/2000/pdf/2000_04_152.pdf)
- Alonso, C., & Fernández, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, 39(9), 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>
- Arroyave, A. (2014). *Viabilidad de la recolección del vidrio para el reciclaje en Colombia* [Informe técnico]. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Recuperado de [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2122/1/ArroyaveAna\\_2014\\_ViabilidadRecoleccionVidrio.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2122/1/ArroyaveAna_2014_ViabilidadRecoleccionVidrio.pdf)
- ASTM International. (2006). *ASTM C642-06: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. <https://www.astm.org/Standards/C642.htm>
- ASTM International. (2009). *ASTM C1585-13: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. <https://www.astm.org/Standards/C1585.htm>
- ASTM International. (2011). *ASTM C348-14: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. <https://www.astm.org/Standards/C348.htm>
- ASTM International. (2012). *ASTM C40-11: Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. <https://www.astm.org/Standards/C40.htm>
- ASTM International. (2014). *ASTM C136/C136M-14: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. <https://www.astm.org/Standards/C136.htm>
- ASTM International. (2015). *ASTM C128-15: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. <https://www.astm.org/Standards/C128.htm>
- ASTM International. (2016). *ASTM C29/C29M-17: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. <https://www.astm.org/Standards/C29.htm>
- ASTM International. (2018). *ASTM C566-13: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. <https://www.astm.org/Standards/C566.htm>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. (2024). Informe de gestión: Responsabilidad Extendida del Productor. Corte 31 de diciembre de 2024 – vigencia 2023. Bogotá: ANLA. Recuperado de <https://www.anla.gov.co/wp-content/uploads/2024/07/Informe-REP-2023.pdf>
- Aziz, I. H. A., Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Yahya, Z., Salleh, M. A. A. M., Chaiprapa, J., Rojviriya, C., Vizureanu, P., Sandu, A. V., Tahir, M. F., Abdullah, A., & Jamaludin, L. (2023). Mechanical performance, microstructure, and porosity evolution of

fly ash geopolymer after ten years of curing age. *Materials*, 16(3), 1096. <https://doi.org/10.3390/ma16031096>

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 211–216. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00659-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00659-7)

Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & Mejía de Gutiérrez, R. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag–metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.004>

Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., de Gutiérrez, R. M., & Gordillo, M. (2014). Mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash–slag blended mortars. *Materials and Structures*, 47(9), 1445–1456. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0107-3>

Berger F, Bogner A, Hirsch A, Ukrainczyk N, Dehn F, Koenders E.(2022). Thermodynamic Modeling and Experimental Validation of Acetic Acid Attack on Hardened Cement Paste: Effect of Silica Fume. *Materials* (Basel). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/>

Bonen, D., & Cohen, M. D. (1992). Magnesium sulfate attack on Portland cement paste—Part I: Formation of a surface double-layer of brucite and gypsum. *Cement and Concrete Research*, 22(1), 169–174. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90147-N](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90147-N)

CONPES 3874. (s.f.). <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3874.pdf>

Constructora Bolívar. (2023). *Informe final de sostenibilidad*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/786891270/Informe-Final-Entrega>

Criado, M., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & de la Torre, A. G. (2009). Alkali activated fly ash: Effect of admixtures on paste rheology. *Rheologica Acta*, 48(4), 447–455. <https://doi.org/10.1007/s00397-008-0345-5>

Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782–2797. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2>

David, E. A., Rodríguez, E. D., & de Gutiérrez, R. M. (2014). Comportamiento químico de cenizas volantes activadas mediante DRX y FTIR. Memorias del VI Congreso Nacional Alconpat 2014, 7–14, <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/27317>

Davidovits, J. (2002). *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs*. Ponencia presentada en la Geopolymer 2002 Conference (28–29 de octubre de 2002), Melbourne, Australia. Disponible en PDF: <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/30YearsGEOP.pdf>

Davidovits, J. (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications* (4<sup>a</sup> ed.). Saint-Quentin, Francia: Institut Géopolymère. ISBN 978-2-9514820-9-8. Disponible en Google Scholar: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25792.89608>

Deja, J. (2002). Immobilization of  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  in alkali-activated slag binders. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1971–1979. [https://www.researchgate.net/publication/256678698\\_Immobilization\\_of\\_Cr6\\_Cd2\\_Zn2\\_and\\_Pb2\\_in\\_alkali-activated\\_slag\\_binders](https://www.researchgate.net/publication/256678698_Immobilization_of_Cr6_Cd2_Zn2_and_Pb2_in_alkali-activated_slag_binders)

Du, H., & Tan, K. H. (2014). Effect of particle size on alkali–silica reaction in recycled glass mortars. *Construction and Building Materials*, 66, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.092>

Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behavior. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313–1321. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00154-4)

Fořt, J., Vejmelková, E., Koňáková, D., Alblová, N., Čáchová, M., Keppert, M., Rovnaníková, P., & Černý, R. (2018). *Application of waste brick powder in alkali-activated aluminosilicates: Functional and environmental aspects. Journal of Cleaner Production*, 194, 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.003>

Gallón Martínez, S., López Gómez, E., & García, C. (2018). Análisis de residuos de ladrillo como agregado grueso para la fabricación de concreto. *Revista Colombiana de Materiales*, (12), 53–69. <https://revistas.udea.edu.co/>

García-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2011). Geopolímeros: Aplicaciones y perspectivas futuras. *Materiales de Construcción*, 61(303), 335–351. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.05010>

García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2016). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. *Cement and Concrete Research*, 41, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>

Giang, T. H., & Pheng, L. S. (2011). Role of construction in economic development: Review of key concepts in the past 40 years. *Habitat International*, 35(1), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2010.06.003>

GIL, C. y PLAZAS, R.(2007) Propuesta para la utilización de cenizas volantes como adición en la fabricación de cemento tipo I en la planta cementera de Holcim Colombia S.A. Documento procedente de la Especialización en Gerencia de Producción y Operaciones, Universidad de La Sabana, Bogotá. <https://intellectum.unisabana.edu.co>

Grupo Bolívar. (s.f.). *Informes de sostenibilidad: Constructora Bolívar*. [https://www.grupobolivar.com.co/wps/portal/sostenibilidad/informes/constructora\\_bolivar](https://www.grupobolivar.com.co/wps/portal/sostenibilidad/informes/constructora_bolivar)

Henao Rios, L. M., Hoyos Triviño, A. F., Villaquirán-Caicedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2023). Effect of the use of waste glass in geopolymer mortars and tiles. *Construction and Building Materials*, 363, 129760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129760>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1996). *NTC 127: Agregados. Evaluación de impurezas orgánicas en el agregado fino*. <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/1996/12/NTC-127-1996.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). *NTC 118: Cementos hidráulicos. Determinación del tiempo de fraguado por medio del aparato de Vicat.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/1997/12/NTC-118-1997.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *NTC 220: Concreto hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos moldeados.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/1998/12/NTC-220-1998.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 77: Agregados. Análisis granulométrico por tamizado.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2000/12/NTC-77-2000.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 92: Agregados. Determinación de la masa unitaria y vacíos entre partículas.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2000/12/NTC-92-2000.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *NTC 237: Agregados. Determinación de la densidad y absorción del agregado fino.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2003/12/NTC-237-2003.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *NTC 112: Concreto. Determinación de la absorción y la densidad relativa.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2006/12/NTC-112-2006.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2007). *NTC 1776: Agregados. Determinación del contenido de humedad por secado.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2007/12/NTC-1776-2007.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *NTC 5784: Cementos. Requisitos generales.* <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2010/12/NTC-5784-2010.pdf>

Izquierdo, S., Díaz, J., Mejía de Gutiérrez, R., & Torres Agredo, J. (2016). Durability of FCC-blended mortar exposed to sodium and magnesium sulfate. *Revista Ingeniería de Construcción*, 31(3), 392–402. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000300004>

Izquierdo, S., Rodríguez, E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2015). Resistencia a la corrosión ácida de morteros con catalizador de craqueo catalítico gastado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(3), 169–176. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732015000300002>

Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>

Kwek, S. Y., Awang, H., & Cheah, C. B. (2021). Influence of Liquid-to-Solid and Alkaline Activator (Sodium Silicate and Sodium Hydroxide) on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials*, 14(8), 1842. <https://doi.org/10.3390/ma14154253>

- Laverde, M. A. (2007). *Bases teóricas sobre cenizas volantes* [Informe técnico]. Incluye definición de cenizas volantes como residuos de la combustión de carbón, así como de madera, residuos urbanos e industrias térmicas. Disponible en Scribd: <https://es.scribd.com/document/362164241/Bases-Teoricas-Fly-Ash>
- LEANpio. (2022, marzo 23). ¿Cuál es el proceso de reciclaje de vidrio? *LEANpio*. <https://www.leanpio.com/es/blog/proceso-reciclaje-del-vidrio>
- Li, M., Qian, C., & Sun, W. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Işıkdag, B., & Yalghuz, M. R. (2023). Strength Development and Durability of Metakaolin Geopolymer Mortars Containing Pozzolans under Different Curing Conditions. *Minerals*, 13(7), 857. <https://doi.org/10.3390/min13070857>
- Lu, J. X., & Poon, C. S. (2018). Use of waste glass in alkali-activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, 163, 670–680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080>
- Luhar, S., & Luhar, I. (2022). Valorisation of waste glasses for geopolymer mortar: An appraisal. *Journal of Composites Science*, 6(1), 30. <https://doi.org/10.3390/jcs6010030>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. Retrieved from <https://www.mheducation.com/highered/product/concrete-microstructure-properties-materials-mehta-monteiro/M9780078026908.html>
- Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). <https://minenergia.gov.co/static/mineriaco/src/document/documento%20carbon.pdf>
- Mohsen, M. O., Aburumman, M. O., Al Diseet, M. M., Taha, R., Abdel-Jaber, M., Senouci, A., & Abu Taqa, A. (2023). Fly ash and natural pozzolana impacts on sustainable concrete permeability and mechanical properties. *Buildings*, 13(8), 1927. <https://doi.org/10.3390/buildings13081927>
- Muñoz Portero, nombre, & José, M. (2020). *Procesamiento de materiales cerámicos fundidos: vidrio plano y lana de vidrio*.
- Osorio, P. (2022). *Cómo se evalúa la calidad de un mortero: retención de agua y trabajabilidad*. Recuperado de <https://fr.scribd.com/document/177062253/Como-Se-Evalua-La-Calidad-de-Un-Mortero>
- Özlem Sallı Bideci, Ö., Bideci, A., & Ashour, A. (2024). Utilization of recycled brick powder as supplementary cementitious materials: A comprehensive review. *Materials*, 17(3), 637. <https://doi.org/10.3390/ma17030637>

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)

Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2023). 3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste. *Cement and Concrete Composites*, 138, Article 104943. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104943>

Patrisia, Y., Law, D. W., Gunasekara, C., & Wardhono, A. (2022). Fly ash geopolymer concrete durability to sulphate, acid and peat attack. In MATEC Web of Conferences, 364, Article 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236402003>

Parra, C., Miñano, I., Calabuig, M., Benito, F., Mateo, J. M., Carrión, E., & Ruiz, C. (2024). Geopolymer with brick and concrete demolition constructions waste. *Materiales De Construcción*, 74(356), e361. <https://doi.org/10.3989/mc.2024.392424>

Pinzón Cuta, C. H., & Pérez Meneses, J. A. (2021). *Cenizas volantes de carbón: Revisión de sus propiedades físicas, químicas y morfológicas* [Trabajo de grado, Universidad de Pamplona]. <https://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/8579>

Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>

Rangan, B. V. (2008). Mix design and production of fly ash-based geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, 82(5), 7–15. Recuperado de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/230717147\\_Fly\\_Ash-Based\\_Geopolymer\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/230717147_Fly_Ash-Based_Geopolymer_Concrete)

Rawson, H. (1997). *Introduction to Glass Science and Technology*. The Society of Glass Technology. Recuperado de [https://www.sgt.org/sites/default/files/sgt\\_documents/IntroToGlassScienceAndTechnology.pdf](https://www.sgt.org/sites/default/files/sgt_documents/IntroToGlassScienceAndTechnology.pdf)

Reciclaje de vidrio. (2013, agosto 6). *Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje*. <https://www.recytrans.com/blog/reciclaje-de-vidrio/>

Robayo, R. A., Mulford, A., Munera, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>

Rovnaník, P., Řezníček, B., & Rovnaníková, P. (2016). Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials. *Procedia Engineering*, 151, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.397>

- Robayo, R. A., Mulford, A., Munera, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>
- Saidu Kamara, Hingha Foday Jr, & Wei Wang. (2023). A review on the utilization and environmental concerns of coal fly ash. *American Journal of Chemistry and Pharmacy*, 2(2), 53–65. <https://doi.org/10.54536/ajcp.v2i2.1609>
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* [Informe técnico, Pontificia Universidad Javeriana]. Recuperado de [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2201/digital\\_24014.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2201/digital_24014.pdf?sequence=1)
- Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 556–567. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>
- Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). Influence of fine glass powder on concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 556–567. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.00>
- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M., & Smith, L. (2018). Eco-efficient cements. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.011>
- Shi, C., & Stegemann, J. A. (2000). Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 803–808. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00234-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00234-9)
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Properties of recycled aggregates from C&D waste. *Construction and Building Materials*, 150, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>
- Silva, Y., & Delvasto, S. (2014). Concreto autocompactante con diferentes niveles de ceniza volante y escoria de combustión de carbón. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 1–9. <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.19249>
- Strand, M., Pagels, J., Szpila, A., Gudmundsson, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., & Sanati, M. (2002). Fly ash penetration through electrostatic precipitator and flue gas condenser in a 6 MW biomass-fired boiler. *Energy & Fuels*, 16(6), 1499–1506. <https://doi.org/10.1021/ef020076b>
- Tariq, S., Scott, A. N., Mackechnie, J. R., & Shah, V. (2020). Durability of high-volume glass powder self-compacting concrete. *Applied Sciences*, 10(22), 8058. <https://doi.org/10.3390/app10228058>
- Tittarelli, F., Giosuè, C., & Mobili, A. (2018). Recycled Glass as Aggregate for Architectural Mortars. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0290-3>

Torres Rubio, N. V., Sarmiento Rojas, J. A., & Gutiérrez-Junco, O. J. (2019). Efecto del tipo de activador en mortero de escoria con caliza. *INGE CUC*, 15(2), 1–10. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.01>

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, 32(2), 05-12. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>

Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Abunada, Z., Lemckert, C., & Giustozzi, F. (2025). Carbon Footprint and Uncertainties of Geopolymer Concrete Production: A Comprehensive Life Cycle Assessment (LCA). *C*, 11(3), 55. <https://doi.org/10.3390/c11030055>

Valbuena Porras, S. G., Mena Serna, M., & García Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. *Tecnura*, 20(2), 43–54. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a08>

Valencia-Saavedra, W. G., Angulo-Ramírez, D. E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2018). Resistencia química de concretos de activación alcalina: Sulfatos y ácidos. *Informador Técnico*, 82(1), 67. <https://doi.org/10.23850/22565035.1351>

Valencia-Saavedra, W. G., Robayo-Salazar, R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2021). Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente basados en altos contenidos de ceniza volante: un análisis a largas edades. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 1–18. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021001>

Villaquirán-Caicedo, M. A., Rodríguez, E., & Mejía-de Gutiérrez, R. M. (2015). Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas (600 y 1200 °C). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v16n1/v16n1a11.pdf>

World Economic Forum. (2024). *Sustainable concrete is possible – here are 4 examples*. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/>

Zhang, J., Provis, J. L., & Reid, A. (2008). *Heavy metal immobilization in fly ash-based geopolymers subjected to prolonged leaching*. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 372–380. Recuperado de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/5539526\\_Geopolymers\\_for\\_immobilization\\_of\\_Cr6\\_Cd2\\_and\\_Pb2](https://www.researchgate.net/publication/5539526_Geopolymers_for_immobilization_of_Cr6_Cd2_and_Pb2)

Zhang, Q., Ranade, R., & Li, V.C. (2014). Feasibility study on fire-resistive engineered cementitious composites. *Aci Materials Journal*, 111, 651-660. <https://doi.org/10.14359/51686830>

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 285–

**296.**<https://www.researchgate.net/publication/298328252> Fly Ash-based Geopolymer Clean Production Properties and Applications