

# INFORME DE TESIS - JAVR

*por* JOSE AMADO VIVAS REYMUNDO

---

**Fecha de entrega:** 13-nov-2023 07:58a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2213638428

**Nombre del archivo:** TESIS\_VIVAS\_REYMUNDO\_JOSE\_AMADO.docx (17.06M)

**Total de palabras:** 20115

**Total de caracteres:** 113543

<sup>1</sup>  
**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TRUJILLO**

**BENEDICTO XVI**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROGRAMA DE ESTUDIOS PROFESIONAL DE**

**INGENIERÍA CIVIL**



**INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO SOBRE LAS PROPIEDADES  
FISICO-QUIMICAS Y MECANICAS DE MORTEROS  
GEOPOLIMERIZADOS MIXTOS A BASE DE CONCRETO  
RECICLADO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

Br. José Amado Vivas Reymundo

**ASESOR**

Mg. Aldo Castillo Chung

<sup>2</sup>  
<https://orcid.org/0000-0002-2270-1671>

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

Vivienda, saneamiento y transporte

**TRUJILLO – PERÚ**

**2023**

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

Excmo. Mons. Héctor Miguel Cabrejos Vidarte, O.F.M.

**Arzobispo Metropolitano de Trujillo**

**Fundador y Gran Canciller de la**

**Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI**

Dr. Luis Orlando Miranda Díaz

**Rector de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI**

Dra. Mariana Geraldine Silva Balarezo

**Vicerrectora académica**

Mg, Ing., Breiner Guillermo Díaz Rodríguez

**Decano de la Facultad de Ingeniería**

Dra. Ena Obando Peralta

**Vicerrectora Académico de Investigación**

Dr. Winston Rolando Reaño Portal

**Director de la Escuela de Posgrado**

Dra. Teresa Sofía Reategui Marín

**Secretaria General**

## DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD

**1** Señor(a) Decano(a) de la Facultad de Ingeniería:

Yo, Mg Aldo Roger Castillo Chung con DNI N° 18132971, como asesora del trabajo de investigación **“INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO SOBRE LAS PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS Y MECANICAS DE MORTEROS GEOPOLIMERIZADOS MIXTOS A BASE DE CONCRETO RECICLADO”**, desarrollada por el bachiller Br. José Amado Vivas Reymundo DNI N° 23569991 **1** respectivamente, egresada del Programa Profesional de Ingeniería Civil, considero que dicho trabajo de titulación reúne los requisitos tanto técnicos como científicos y corresponden con las normas establecidas en el reglamento de titulación de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI y en normativa para la presentación de trabajos de titulación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Por tanto, autorizo la presentación del mismo ante el organismo pertinente para que sea sometido a evaluación por la comisión de la clasificación designado por el Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

**1** Se declara también que el porcentaje de similitud o coincidencia es menor o igual al 20 %, estándar permitido por el Reglamento de grados y títulos de la Universidad Católica de Trujillo.



Mg. Aldo Castillo Chung  
DNI: 18132971

## DEDICATORIA

Me gustaría dedicar esta tesis a mi hija Paola por su apoyo,<sup>25</sup> por su amor y por creer siempre en mí. A mis padres que me han enseñado encarar las adversidades y no desfallecer en el intento; me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi empeño, y sin pedir nunca nada a cambio. Para el amor de vida Nelly,<sup>16</sup> a ella especialmente le dedico esta tesis. Por su paciencia, por su comprensión, por su empeño, por su fuerza.<sup>16</sup> Nunca le podré estar suficientemente agradecido.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

## AGRADECIMIENTO

El principal agradecimiento a Dios, quien me ha dado <sup>1</sup> la fortaleza para seguir adelante. A mi hermano Carlos por su apoyo incondicional.

Agradezco a mis profesores que me guiaron y me dieron todo el apoyo para realizar esta investigación.

Y finalmente gracias a mi familia, que sin su apoyo y estímulo no habría sido posible culminar este proyecto.

## ÍNDICE

<b>1</b> AUTORIDADES UNIVERSITARIAS.....	ii
CONFORMIDAD DEL ASESOR .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD .....	vi
ÍNDICE .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	x
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	14
II. METODOLOGÍA.....	32
2.1. Enfoque y tipo.....	32
2.2. Diseño de Investigación.....	32
<b>2</b> 2.3. Objeto de Estudio.....	33
2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos.....	37
2.4.1. Instrumentos de recojo de datos.....	37
2.4.2. Técnicas de recojo de datos.....	37
2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos.....	37
<b>32</b> 2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de información.....	38
2.5.1. Técnicas de procesamiento.....	38
2.5.2. Análisis de datos.....	40
2.6. Aspectos éticos en investigación.....	41
2.6.1. Honestidad y Transparencia.....	41
2.6.2. Equidad y Justicia.....	41

2.6.3. Originalidad y Reconocimiento de Fuentes.....	41
2.6.4. Gestión Responsable de Recursos.....	42
2.6.5. Integridad en la Presentación de Resultados.....	42
<b>9</b> III. RESULTADOS.....	<b>43</b>
3.1. Descripción de resultados.....	43
3.1.1. Influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	43
3.1.2. Influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	44
3.1.3. Influencia de polvo de vidrio sobre <b>11</b> la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	46
3.1.4. Influencia de polvo de vidrio sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	48
3.1.5. Influencia de polvo de vidrio sobre la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H de morteros geopolimerizados mixtos a base <b>1</b> de concreto reciclado.....	51
<b>3.2. Prueba de Hipótesis.....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	53
3.2.2. Influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	56
3.2.3. Influencia de polvo de vidrio sobre <b>11</b> la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	59
3.2.4. Influencia de polvo de vidrio sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	62



3.2.5. Influencia de polvo de vidrio sobre la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	62
<sup>30</sup> IV. DISCUSIÓN.....	63
V. CONCLUSIONES.....	68
VI. RECOMENDACIONES.....	69
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	70
ANEXOS.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ensayo de resistencia a la compresión de muestras de mortero de cemento.....	24
<b>Figura 2.</b> Proceso de geopolimerización para la fabricación de geopolímero cemento/concreto.....	26
<b>Figura 3.</b> Polvo de vidrio de desechos: (a) 0–125 $\mu\text{m}$ , (b) 300–500 $\mu\text{m}$ y (c) 500–700 $\mu\text{m}$ .....	28
<b>Figura 4.</b> Concreto reciclado: (a) dimensiones naturales y (b) vista microscópica.....	30
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo del procedimiento experimental.....	40
<b>Figura 6.</b> Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	43
<b>Figura 7.</b> Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	44
<b>Figura 8.</b> Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.....	46
<b>Figura 9.</b> Micrografías SEM de muestras de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado con adición de polvo de vidrio en porcentajes: a) M5%, b) M 10 %, c) M15% y d) M20%.....	48
<b>Figura 10.</b> Gráfico de espectros FTIR de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado bajo la influencia de polvo de vidrio.....	51
<b>Figura 11.</b> Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.....	53
<b>Figura 12.</b> Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.....	54
<b>Figura 13.</b> Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.....	55
<b>Figura 14.</b> Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.....	56

**Figura 15.** Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.....57

**Figura 16.** Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.....58

**Figura 17.** Prueba de hipótesis <sup>2</sup> de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.....59

**Figura 18.** Prueba de hipótesis <sup>2</sup> de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.....60

**Figura 19.** Prueba de hipótesis <sup>2</sup> de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.....61

<sup>1</sup>  
**INDICE DE TABLAS**

**Tabla 1.** Número total de muestras.....33

**Tabla 2.** Cuadro de operacionalización de variables.....35

## RESUMEN

<sup>1</sup> La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia del polvo de vidrio sobre las propiedades físico-químicas: densidad, porosidad, porcentaje de fases amorfas y formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H; y mecánicas, esfuerzo de compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado, cumpliendo la norma ASTM C 109. Esta tesis empleó un diseño experimental y usó una metodología de carácter aplicada, explicativa y cuantitativa. Se fabricaron 75 morteros geopolímeros mixtos de dimensiones 50x50x50mm, teniendo en cuenta como parámetros de mezcla una relación a/c de 0.45 y como relación conglomerante/agregado de 1:1. Dicho material conglomerante fueron concreto reciclado pulverizado y polvo de vidrio ambos pasantes por tamiz N° 400, y como agregado fino; arena gruesa. Teniendo en cuenta que el polvo de vidrio se adicionó como reemplazo de concreto reciclado en niveles de 0%, 5%, 10 %, 15% y 20%. Por último, estas mezclas se sometieron la activación alcalina, mediante una solución de NaOH 8M. Luego de su conformación, los morteros fueron caracterizados físico-químicamente a través de métodos SEM y FTIR. Así mismo fueron caracterizados mecánicamente mediante ensayo de compresión ASTM C 109 a 7, 14 y 28 días. Como resultados se obtuvieron que ante el incremento del porcentaje de adición de polvo de vidrio en el rango 5% a 20%, se incrementó la densidad, resistencia a la compresión, formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H, y se disminuyó el porcentaje de fases amorfas y porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.

**Palabras Clave:** *polvo de vidrio, geopolimerización, morteros*

## 1 ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the influence of glass powder on the physicochemical properties: density, porosity, percentage of amorphous phases and formation of N-A-S-H and C-A-S-H type gels; and mechanical, compressive stress of mixed geopolymerized mortars based on recycled concrete, complying with ASTM C 109.

In this thesis was used an experimental design and used an applied, explanatory and quantitative methodology. 75 mixed geopolymer mortars with dimensions 50x50x50mm were manufactured, having a w/c ratio of 0.45 and a binder/aggregate ratio of 1:1 as mixing parameters. The binder material was pulverized recycled concrete and glass powder, both passing through a N° 400 mesh, and as fine aggregate; coarse sand. To keep in mind, the glass powder that was added was a replacement for recycled concrete at levels of 0%, 5%, 10 %, 15% and 20%. Finally, these mixtures were subjected to alkaline activation, using an 8M NaOH solution. After its manufacturing, the mortars were characterized physicochemically through SEM and FTIR methods. They were also mechanically characterized by ASTM C 109 compression test at 7, 14 and 28 days.

As results, it was obtained that with the increase in the percentage of addition of glass powder in the range 0% to 20%, the density, compression resistance, formation of N-A-S-H and C-A-S-H type gels increased, and the percentage of amorphous phases and porosity of mixed geopolymerized mortars based on recycled concrete was reduced.

**Keywords:** *glass powder; geopolymerization, pastes, mortars*



## I. INTRODUCCIÓN

La gestión eficaz de los residuos de construcción presenta un desafío ambiental crítico en el mundo. La industria de la construcción genera cantidades sustanciales de desechos, incluidos materiales no biodegradables como el vidrio y el concreto, que eventualmente van a parar en botaderos, lo que provoca el agotamiento de los recursos y daños ecológicos. La implementación de métodos de reciclaje avanzados es fundamental para combatir este problema, ya que no solo reduce la capacidad de desechos en dichos botaderos, sino que también promueve la eficiencia <sup>15</sup> de los recursos y minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero. Abordar este desafío requiere técnicas innovadoras de clasificación, procesamiento y recuperación adaptadas a cada tipo de material, junto con el desarrollo de una sólida infraestructura de reciclaje y marcos regulatorios para garantizar prácticas sostenibles de gestión de residuos (de la Villa et al., 2022).

Durante las últimas décadas, la urbanización del mundo se ha incrementado exponencialmente coincidiendo con el crecimiento de la población humana; por lo tanto, se ha amplificado el uso de más recursos materiales (Purchase et al., 2022). Debido a la falta de un marco de gestión integrada de residuos, se estima que más del 75% de dichos residuos <sup>1</sup> generados por la industria de la construcción tienen valor residual y actualmente no se reutilizan ni reciclan (Yeheyis et al, 2013). De acuerdo con esta definición, dichos residuos de construcción y demolición resultantes del sector de la construcción representan el 30 % del total de residuos <sup>50</sup> producidos a nivel mundial (Papargyropoulou et al., 2011), con una media estimada de más del 35 % de todos los residuos de construcción y demolición que se eliminan anualmente en botaderos (Menegaki y Damigos, 2018).

Este tema, residuos de la construcción, en el Perú presenta un desafío multifacético con importantes implicaciones ambientales, económicas y sociales. La rápida urbanización, el desarrollo de infraestructura y una industria de la construcción en crecimiento han llevado a un aumento en la generación de desechos de las actividades de construcción, incluidos materiales como concreto, ladrillos y plásticos. Los sistemas inadecuados de gestión de desechos, la infraestructura de reciclaje insuficiente y la falta de conciencia entre las partes interesadas <sup>52</sup> exacerban el problema, lo que resulta en la degradación de la tierra, la contaminación del aire y el agua y la destrucción del hábitat. Esto no solo contribuye a la degradación ambiental, sino que también obstaculiza los esfuerzos del país hacia el

desarrollo sostenible y la resiliencia climática. Según el <sup>43</sup> Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en América Latina y el Caribe, el déficit de vivienda adecuada viene a ser un problema global. <sup>22</sup> En el caso de nuestro país, se estima que el déficit de vivienda adecuada alcanza al <sup>22</sup> 72% de las familias (Banco Interamericano de Desarrollo 2012). Adicionalmente, el Plan de Desarrollo Urbano Metropolitano (PLAM 2035) estima que aún hay 7.6 millones de personas viviendo en barrios marginales. Tocar este problema requiere un compromiso de construcción sustancial, que tiene el potencial de impactar significativamente el medio ambiente dada la influencia ecológica sustancial asociada con el sector de la construcción (Rondinel, 2023).

Un método eficaz para reciclar especialmente los residuos de concreto y vidrio de la industria de la construcción es a través del proceso de geopolimerización, la cual implica la creación de morteros que exhiban propiedades mecánicas optimizadas. La geopolimerización consiste en utilizar materiales de desecho como cenizas volantes o escoria, junto con activadores alcalinos, para formar un aglutinante de geopolímero que puede reemplazar al cemento Portland tradicional. Planteándonos la interrogante: <sup>8</sup> ¿Cuál es la influencia del polvo de vidrio sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado? Este enfoque innovador no solo reduce el impacto ambiental de la eliminación de desechos, sino que también minimiza la necesidad de nuevas materias primas. Al incorporar residuos de concreto que yacen en botaderos y vidrio reciclados en la mezcla de geopolímeros, los morteros resultantes demuestran una mayor resistencia, durabilidad y resistencia a diversos factores ambientales. Este método muestra una solución sostenible y eficiente que contribuye <sup>51</sup> tanto a la reducción de residuos como al desarrollo de materiales de construcción de alto rendimiento.

El propósito de investigación, busca determinar en qué medida el porcentaje de polvo de vidrio influye sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado. De este modo, los residuos de tanto de concreto reciclado como los residuos de vidrio al ser activados mediante la geopolimerización, podrían tener el potencial de ofrecer mejores características de rendimiento en los dominios económico, funcional y ambiental.

La presente investigación poseyó una justificación general de suma importancia debido a su potencial para abordar varios problemas críticos en la industria de la construcción. A medida que crecen las preocupaciones ambientales y de sustentabilidad, la



4  
utilización de materiales de desecho como el concreto reciclado y el polvo de vidrio puede reducir sustancialmente la huella ecológica de las actividades de construcción. Este estudio tiene como objetivo mejorar nuestra comprensión de cómo estos materiales de desecho influyen en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de morteros geopolimerizados, contribuyendo así al desarrollo de prácticas de construcción más ecológicas y económicamente viables.

Su relevancia práctica se radicó en la oportunidad de optimizar el uso de materiales de desecho en la producción de materiales de construcción. El concreto reciclado, derivado de los residuos de demolición, puede ayudar a gestionar la eliminación de dichos residuos mientras se conservan los recursos naturales. 8  
La adición de polvo de vidrio, un subproducto de las industrias del vidrio, también puede reducir los desechos y contribuir a la conservación de las materias primas naturales. Comprender los efectos de estos aditivos en los morteros geopolimerizados proporcionará conocimientos prácticos para ingenieros, arquitectos y profesionales de la construcción que buscan alternativas sostenibles para los materiales convencionales a base de cemento.

Desde una perspectiva teórica, complementó nuestra comprensión de la ciencia y la química de los materiales. Los geopolímeros se forman a través de la reacción de materiales aluminosilicatos con activadores alcalinos, presentando una estructura fundamentalmente diferente en comparación con los materiales tradicionales a base de cemento Portland. Al incorporar polvo de vidrio, que contiene sílice y otros óxidos, en la matriz del geopolímero, la compleja interacción de las reacciones químicas y las interacciones de los materiales puede potenciar a los comportamientos mecánicos y químicos de estos compuestos. Esta investigación contribuye a la fundamentación teórica de los materiales de construcción sostenibles.

42  
Su impacto socioambiental fue primordial. La industria de la construcción es uno de los principales contribuyentes a las emisiones globales de carbono debido a la producción de cemento convencional, que libera cantidades significativas de CO<sub>2</sub> durante su proceso de fabricación. Al utilizar concreto reciclado y polvo de vidrio en morteros geopolimerizados, la huella de carbono de la construcción se puede reducir significativamente. Esto puede 34  
ayudar a mitigar el cambio climático y promover el desarrollo sostenible. Además, la utilización de materiales de desecho puede estimular las prácticas de economía circular, reduciendo la presión de los vertederos y conservando los recursos naturales.

El enfoque metodológico implicó un análisis exhaustivo de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Se realizaron ensayos <sup>3</sup> de resistencia a la compresión, para evaluar los efectos del polvo de vidrio en el desempeño de los morteros geopolimerizados mixtos. Estos análisis proporcionaron datos empíricos que pueden guiar futuras prácticas de construcción y diseño de materiales. La metodología experimental tiene como objetivo proporcionar resultados precisos y confiables, contribuyendo a la solidez de los hallazgos y su aplicabilidad en escenarios del mundo real. La investigación seguirá las normas y prácticas establecidas para garantizar la validez de los resultados del estudio.

A partir de lo expresado anteriormente, la investigación planteó <sup>1</sup> como objetivo general determinar la influencia del polvo de vidrio sobre las propiedades fisico-químicas y mecánicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.

Del mismo modo se plantearon como objetivos específicos: Determinar las modificaciones de las propiedades físicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado mediante la norma ASTM C188 y microscopia electrónica de barrido (SEM). Determinar las modificaciones de las propiedades químicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado mediante método de caracterización FTIR. Determinar las modificaciones de las propiedades mecánicas en compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado mediante norma ASTM C 10 9.

Como hipótesis se consideró que, el incremento del porcentaje de polvo de vidrio en el rango de 0% a 20%, modifica la composición química; incrementando <sup>10</sup> la formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H en los morteros, modifica la resistencia mecánica; incrementando <sup>1</sup> la resistencia a la compresión de morteros, y que modifica también las propiedades físicas; incrementando la densidad y disminuyendo el porcentaje de fases amorfas, y además disminuyendo la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.

Como fuentes de investigación internacional, se tomó en cuenta a Bahrami et al. (2023) quienes tuvieron como objetivo de investigación el poder estudiar el efecto del polvo de vidrio reciclado (WGP, <sup>4</sup> por sus siglas en inglés) en la producción de geopolímeros sostenibles. Se realizaron pruebas <sup>28</sup> de resistencia a la compresión ASTM C39, resistencia a la tracción de división C496 y tiempo de fraguado en muestras de geopolímero ASTM C143.

Se utilizaron diferentes porcentajes de polvo de vidrio reciclado en niveles de 10 %, 20%, 30% y 40% combinados con ceniza volante y se examinó el efecto de la molaridad del hidróxido de sodio (NaOH) como agente activador de la geopolimerización en niveles de M 11, M13 y M16. Los resultados mostraron que a medida que aumentaba el contenido de WGP, la trabajabilidad del geopolímero disminuía, como también la resistencia a la compresión y tracción. Para un contenido de WGP del 10 %, las resistencias fueron de 3.57 MPa y 4.14 MPa respectivamente. Y para un contenido de WGP del 40%, las resistencias fueron de 2.18 MPa y 2.92 MPa respectivamente. Lo que si se observó fue que la molaridad del NaOH afectaba significativamente el tiempo de fraguado y a las resistencias. Teniendo en cuenta los efectos combinados de la molaridad de WGP y NaOH, se recomendó el uso de WGP al 10 % con M13 NaOH para obtener geopolímeros sostenibles óptimos.

También, Singh et al. (2021) en su investigación plantearon el objetivo de poder desarrollar un material novedoso que mejore la eficiencia energética de los edificios y al mismo tiempo sea sostenible, mediante la influencia de la incorporación de polvo de vidrio en bloques de geopolímero espumado. Se utilizaron polvo de vidrio y ceniza volante clase F (bajo calcio) rica en alúmina y sílice como materiales principales para el geopolímero espumado, y polvo de triturado como material de relleno. Se realizaron análisis térmicos utilizando un software de simulación energética de edificios y análisis térmicos detallados utilizando un solucionador de flujo de calor conjugado incompresible desarrollado en OpenFOAM y la normativa ASTM C67 para los ensayos mecánicos. Los resultados mostraron un ahorro del 8.94% y 10.47% en la demanda y uso de energía durante la etapa operativa del edificio, y una resistencia a compresión satisfactoria de 11.3 MPa para los bloques de geopolímero espumado con polvo de vidrio incorporado.

Por su parte, Jiang et al. (2020) tuvieron como objetivo de investigar la posibilidad de utilizar polvo de vidrio reciclado (WGP) como sustituto de la ceniza volante (FA) en la producción de pastas geopoliméricas. Se evaluaron las características físicas y las propiedades mecánicas de las pastas geopoliméricas a base de FA después de ser expuestas a altas temperaturas (800 °C, 1000 °C y 1200 °C). Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y resistencia de unión utilizando una máquina de ensayo hidráulica con una velocidad de carga de desplazamiento de 3 mm/min. Estas pruebas siguieron un procedimiento similar a las normas ASTM C900 y ASTM C39, respectivamente. Además, se llevaron a cabo análisis de microscopía electrónica de barrido

(SEM), espectrometría de rayos X dispersiva en energía (EDS) y difracción de rayos X (XRD) para investigar las características microestructurales y el comportamiento termofísico de las muestras de pasta geopolimérica. Los resultados mostraron que la incorporación de WGP mejoró la trabajabilidad de las pastas geopoliméricas y aceleró el proceso de policondensación. Se observó una mejora en la retención de las propiedades mecánicas después del tratamiento térmico, especialmente a 10 00 °C, cuando el contenido de WGP alcanzó el 30%. La resistencia residual a la compresión de las pastas geopoliméricas aumentó con la adición de WGP, alcanzando un valor máximo de 50 MPa a 10 00 °C. Asimismo, la resistencia de unión entre la pasta geopolimérica y el acero de refuerzo también se vio mejorada con la incorporación de WGP, alcanzando un valor máximo de 25 MPa. Estos resultados indican que el uso de WGP como sustituto de FA en las pastas geopoliméricas puede ser una opción viable para mejorar sus propiedades termofísicas y mecánicas.

Así mismo Hashmie et al. (2020) estudiaron en el uso de polvo de vidrio reciclado como estabilizador de suelo de algodón negro (BCS) en su investigación. El objetivo fue determinar el efecto del polvo de vidrio reciclado en la resistencia a la compresión no confinada del suelo estabilizado. El método utilizado consistió en agregar diferentes porcentajes de polvo de vidrio reciclado al suelo y mezclarlo a fondo. Luego, se agregó una solución alcalina de hidróxido de sodio y silicato de sodio para iniciar la reacción de geopolimerización. Las muestras estabilizadas se curaron al aire durante 3 y 7 días a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos en términos de resistencia a la compresión se observaron que la resistencia aumentó con el aumento del porcentaje de polvo de vidrio reciclado hasta un valor óptimo del 9%, y luego disminuyó. Los valores óptimos de resistencia a la compresión fueron de 41.03 MPa para muestras curadas durante 3 días y 53.02 MPa para muestras curadas durante 7 días. Las conclusiones de la investigación fueron las siguientes: el polvo de vidrio reciclado basado en geopolímero es efectivo para aumentar la resistencia del suelo de algodón negro y puede ser utilizado como estabilizador de suelo. Además, se encontró que el aumento del tiempo de curado también aumenta la resistencia del suelo estabilizado.

De igual forma Periyasamy et al. (2022) en su investigación, examinaron los cambios en la trabajabilidad y propiedades mecánicas del concreto geopolimérico ternario a base de una combinación de escoria de alto horno granulada molida (GGBS), Polvo de Vidrio (WGP)

con Metakaolin y ceniza volante. El objetivo fue evaluar la viabilidad de utilizar WGP como ingrediente crudo precursor en la preparación de una matriz geopolimérica sostenible. El método utilizado incluyó la sustitución de diferentes niveles de WGP (del 25% al 40%) en ocho proporciones de mezcla diferentes. Se realizaron pruebas de cono de asentamiento para evaluar la trabajabilidad del concreto geopolimérico fresco, y se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, tracción y flexión según las normas IS:516-1959. Los resultados mostraron que el incremento en los niveles de reemplazo de WGP mejoró las características de trabajabilidad de la matriz geopolimérica fresca en todas las proporciones de mezcla. La proporción de 55% de GGBS, 35% de WGP y 10 % de MK con una solución de NaOH al 8M proporcionó la mayor resistencia a la compresión (59.21 MPa), tracción (6.60 MPa) y flexión. En conclusión, se encontró que el WGP puede ser utilizado como un ingrediente crudo precursor en la preparación de una matriz geopolimérica sostenible. Además, se demostró que el incremento en los niveles de reemplazo de WGP mejora las características de trabajabilidad del concreto geopolimérico fresco. Estos hallazgos podrían abrir la dirección para el desarrollo de un aglutinante geopolimérico ternario sostenible en aplicaciones prácticas de construcción.

Por su parte, Atoyebi et al. (2023) estudiaron sobre producción de paneles de techo a partir de geopolímeros de polvo de vidrio y plásticos de tereftalato de polietileno (PET) reciclados. El objetivo fue evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los paneles de techo fabricados y determinar el impacto de diferentes variables en su desempeño. El método utilizado consistió en activar alcalinamente el polvo de vidrio reciclado y combinarlo con agregados de plástico PET fino y grueso. Luego, los paneles se curaron para formar los paneles de techo. Se realizaron pruebas de absorción de agua, hinchamiento del espesor y densidad para evaluar las propiedades físicas de los paneles. También se determinaron el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad para evaluar las propiedades mecánicas. En términos de resultados numéricos, el panel J con un contenido de 92.5% de partículas de PET (fino y grueso) y 7.5% de partículas de vidrio mostró una absorción de agua del 16.561%, un hinchamiento del espesor del 3.332% y una densidad de 0.918 g/cm<sup>3</sup>. En conclusión, los paneles de techo fabricados a partir de geopolímeros de vidrio en polvo y plásticos PET reciclados mostraron propiedades físicas y mecánicas satisfactorias. El contenido de partículas de PET y vidrio en los paneles tuvo un impacto significativo en su desempeño. Estos resultados sugieren que los paneles de techo fabricados con materiales reciclados podrían ser una alternativa sostenible y rentable a los materiales convencionales.

Terminando con Samarakoon y Ranjith (2021) quienes estudiaron en su investigación el uso de vidrio reciclado en la fabricación de materiales de construcción alcalinos activados (AABs). El objetivo fue evaluar el efecto de la adición de vidrio triturado en las propiedades de resistencia de los AABs y analizar su mineralogía y microestructura. El método utilizado incluyó pruebas de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) para evaluar la resistencia de los AABs endurecidos. También se utilizó fotogrametría ARAMIS para capturar las deformaciones laterales, el desarrollo de las deformaciones y las etapas de falla durante la carga. Se realizaron análisis de difracción de rayos X (XRD) para identificar la mineralogía de los AABs endurecidos y microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la microestructura. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión de los AABs aumentó con la edad de curado. Obteniendo valores de 29 MPa a 28 días con 30% de polvo de vidrio, y 24 MPa a 28 días con 0% de polvo de vidrio. Sin embargo, se observó una ligera reducción en la resistencia a la edad de 1 día, debido a las tasas de disolución más bajas del vidrio y una activación más lenta de los precursores en una concentración de NaOH suave. La inclusión de vidrio en los AABs mejoró tanto la resistencia como la microestructura de los materiales. Se encontró que la adición de vidrio produce productos de hidratación a base de calcio que alteran la red geopolimérica de los sistemas convencionales basados en cenizas volantes. En resumen, la investigación concluyó que la inclusión de vidrio reciclado en los AABs ofrece soluciones prometedoras en términos de reducción de residuos, ahorro de costos y materiales vírgenes, y la inertización de materiales peligrosos.

Como fuentes de investigación nacional, se tomó en cuenta a Sandoval (2019) quien en su investigación tuvo como objetivo determinar la resistencia a la compresión de mortero mediante la sustitución de cemento por una combinación de polvo de vidrio y concha abanico en niveles de 9% y 18%. Este estudio se realizó en Chimbote, empleando agregado fino proveniente de la Cantera Rubén, residuos de vidrio de CORPORACION PACIFICO S.R.L ubicada en Chimbote, Concha de Abanico del Mercado 'La Sirena' y Cemento Portland Tipo I. La metodología experimental empleada en la investigación involucró la incorporación de polvo de vidrio y concha abanico como constituyentes novedosos en la producción de mortero de albañilería. La activación se logró a través de procesos de molienda y calcinación controlada, lo que condujo a una mejora en sus componentes de óxido. En concreto, el polvo de vidrio alcanzó un 83.875% de óxido de sílice, mientras que el polvo de concha abanico contuvo un 82.526% de óxido de calcio. Estos materiales fueron

mezclados y utilizados como reemplazos parciales del cemento en proporciones de 2:1, apegados a la norma técnica peruana NTP 334.051. La resistencia a la compresión del mortero resultante se evaluó a los 3, 7 y 28 días de curado, con comparaciones con un mortero convencional. La mayor resistencia a la compresión alcanzada fue de 50.27 MPa, lograda mediante una sustitución del 9% de cemento a los 28 días.

También, Choca (2021) en su presente investigación tuvo el objetivo de evaluar cómo afecta la presencia de polvo de vidrio a las propiedades del concreto, tanto cuando todavía se encuentra en su estado plástico como cuando se ha endurecido por completo. La hipótesis que sustenta este estudio postula que el polvo de vidrio produce un efecto beneficioso sobre las propiedades del concreto tanto en estado fresco como curado. La metodología de investigación siguió principios científicos, adoptando un enfoque aplicado con alcance explicativo y un diseño de investigación experimental. La población de investigación abarcó especímenes de concreto que incorporaban polvo de vidrio, así como concreto convencional. En total se conformaron 120 ejemplares, y dado que se consideró a toda la población, no se aplicó ninguna técnica de muestreo específica para la selección de la muestra. Como resultados, el hallazgo principal sugirió que la inclusión de polvo de vidrio afecta significativamente varias características del concreto en su estado fresco, incluido el asentamiento, el peso unitario, el rendimiento y el contenido de aire ( $p < 0.05$ ), aunque no afecta la temperatura ( $p > 0.05$ ). En relación a las propiedades que presenta el concreto curado, el estudio reveló una influencia sustancial ( $p < 0.05$ ) del polvo de vidrio en las resistencias a compresión y flexión a los 14, 21 y 28 días.

Culminando con Lopez y Fajardo (2022) quienes tuvieron como objetivo principal de ofrecer un enfoque alternativo que aborde tanto las preocupaciones ambientales como la creciente necesidad de concreto. A través de la investigación se profundizó en la elaboración de diseños de mezclas de concreto que incorporaron proporciones variables de polvo de vidrio (20 %, 25 % y 30 %) para determinar la proporción más adecuada que mantenga los atributos mecánicos. Esta proporción óptima se seleccionó luego para la producción de bloques de concreto. Se procedió a realizar un análisis comparativo entre estos bloques, compuestos por el porcentaje de polvo de vidrio elegido, y los bloques convencionales, valorando sus respectivas características. Más allá de la evaluación de la propiedad, se evalúa y yuxtapone el costo asociado con la producción de bloques y concreto que contiene polvo de vidrio. Cuantificando también la reducción de las emisiones de dióxido de carbono que

se puede lograr al frenar el consumo de combustible durante la fabricación del cemento mediante la utilización del vidrio como sustituto parcial del cemento. Se obtuvieron resultados, concluyendo que al sustituir el 25% del contenido de cemento por polvo de vidrio dentro de las formulaciones de concreto diseñadas para la fabricación de bloques, se experimentó una disminución proporcional de necesidad de cemento, la cual posteriormente contribuyó a una menor emisión de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento, con una reducción estimada de aproximadamente 413.03 kg de este gas de efecto invernadero por cada mil bloques.

Como bases teóricas se partió desde la muestra de estudio, el cual es un mortero de cemento, siendo un material de construcción por excelencia que surge de la amalgama de tres componentes clave: cemento, arena y agua. Su función principal es servir como agente aglutinante, cementando varios elementos de construcción en una estructura unificada. Esta mezcla se somete a un proceso químico complejo conocido como hidratación, en el que las partículas de cemento reaccionan con el agua, lo que resulta en la formación de una matriz sólida que une las partículas de arena. A medida que la matriz se endurece con el tiempo, desarrolla una resistencia a la compresión considerable, lo que contribuye a la estabilidad general y la capacidad de carga del proyecto de construcción. Las proporciones de estos componentes se pueden ajustar para crear morteros de diferentes resistencias, consistencias y características para satisfacer los requisitos específicos de diversas aplicaciones (Warren, 2020).

Las propiedades de un mortero de cemento surgen de la intrincada interacción de sus materiales constituyentes. El cemento, actuando como aglutinante, favorece la reacción química con el agua que finalmente conduce a la solidificación de la matriz. El componente arena agrega volumen y trabajabilidad a la mezcla, mejorando sus propiedades de manejo y aplicación. El agua, al ser el catalizador de la hidratación, inicia la transformación química del cemento, lo que lleva al desarrollo gradual de resistencia y durabilidad. El mortero resultante muestra una impresionante resistencia a la compresión, lo que garantiza su capacidad para soportar cargas y presiones ambientales. Además, la formación de una matriz sólida le da al mortero una mayor cohesión, lo que ayuda a su capacidad de adherirse firmemente a diferentes superficies. Las propiedades del mortero de cemento se pueden personalizar ajustando las proporciones de sus componentes, lo que permite la



personalización según las necesidades específicas de un proyecto de construcción (Nayana y Rakesh).

### Figura 1

<sup>3</sup> *Ensayo de resistencia a la compresión de muestras de mortero de cemento (Yan et al., 2018)*



Este material asume una posición de suma importancia en el ámbito de la construcción debido a sus contribuciones multifacéticas. Desempeña un papel fundamental en el establecimiento de la estabilidad estructural al unir varios componentes como ladrillos, piedras y bloques de concreto, formando muros robustos, tabiques y estructuras de carga. Su naturaleza cohesiva salvaguarda la longevidad de estas estructuras al evitar la intrusión de humedad y elementos externos. Esta característica protectora es particularmente significativa en estructuras de concreto, donde el mortero de cemento actúa como un escudo para el refuerzo embebido, mitigando el riesgo de corrosión y posterior degradación estructural. Además, el mortero de cemento es fundamental para mejorar la resistencia al fuego de las estructuras, lo que refuerza su seguridad y el cumplimiento de los códigos de construcción. Su versatilidad le permite adaptarse a una miríada de aplicaciones, que van desde construcciones residenciales, donde se utiliza para enyesar y terminar, hasta proyectos de infraestructura a gran escala como puentes y carreteras, donde su durabilidad y resistencia son cruciales (Cuffari, 2019)

<sup>33</sup> Su versatilidad se muestra a través de su amplia gama de aplicaciones en la industria de la construcción. En proyectos residenciales, se utiliza en tareas como el enlucido de

paredes, la creación de acabados decorativos y la colocación de ladrillos o piedras para establecer paredes y tabiques. Para construcciones comerciales e industriales, el mortero de cemento es esencial para formar muros de mampostería resistentes, estructuras de carga y sistemas de pisos duraderos. Es especialmente relevante en proyectos de infraestructura, incluida la construcción de carreteras, puentes, túneles y represas, donde su resiliencia frente a diversos factores ambientales es crítica. La adaptabilidad del mortero de cemento se ejemplifica por la capacidad de producir diferentes grados y formulaciones, cada uno adaptado a requisitos específicos. El ajuste de las proporciones de cemento, arena y agua permite la creación de morteros con diferentes resistencias, trabajabilidad y tiempos de fraguado, lo que lo convierte en una herramienta indispensable para arquitectos, ingenieros y constructores que buscan optimizar el rendimiento de sus estructuras (Cuffari, 2019)

Siguiendo con la geopolimerización, la cual es un proceso revolucionario e innovador en el ámbito <sup>56</sup> de la ciencia de los materiales y la ingeniería de la construcción. Implica la creación de polímeros inorgánicos <sup>10</sup> a través de la reacción química de materiales de aluminosilicato, como cenizas volantes, escoria o arcillas naturales, con activadores alcalinos como hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, a menudo en presencia de agua. A diferencia de la producción de cemento convencional, la geopolimerización no se basa en el uso extensivo de piedra caliza y hornos de alta temperatura, lo que la hace más sostenible desde el punto de vista ambiental. Este proceso imita los procesos geológicos naturales que forman los minerales, lo que conduce al desarrollo de un material altamente estable y duradero con propiedades comparables o incluso superiores a las de los materiales tradicionales a base de cemento Portland.

**Figura 2**

*Proceso de geopolimerización para la fabricación de geopolímero cemento/concreto (Shamsaei et al., 2021)*



Los materiales de geopolímeros poseen una notable variedad de propiedades que los distinguen de los materiales convencionales a base de cemento. Una de las características más significativas es su excepcional durabilidad y resistencia a la degradación química, haciéndolos aptos para su uso en ambientes agresivos como condiciones ácidas o alcalinas. Los geopolímeros exhiben una impresionante resistencia a la compresión y baja contracción, atributos que contribuyen a su idoneidad para aplicaciones estructurales. Además, estos materiales suelen tener una huella de carbono más baja <sup>53</sup> en comparación con los métodos tradicionales de producción de cemento debido a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la fabricación. Los enlaces químicos en las estructuras de geopolímeros son responsables de su resistencia mecánica y estabilidad, y la naturaleza mineral del material contribuye a su resistencia al fuego ya las altas temperaturas (Shamsaei et al., 2021).

Este proceso tiene una importancia inmensa debido a su potencial para revolucionar la industria de la construcción al <sup>15</sup> proporcionar una alternativa sostenible a los materiales convencionales a base de cemento. La necesidad reducida de producción de clínker, que es una fuente importante de emisiones de carbono en la fabricación de cemento, se alinea con los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático. <sup>34</sup> Los geopolímeros <sup>47</sup> también pueden desempeñar un papel importante para abordar los problemas de gestión de residuos, ya que pueden incorporar subproductos industriales como cenizas volantes y escoria, desviando estos materiales de los vertederos. Además, su excepcional durabilidad y resistencia a las

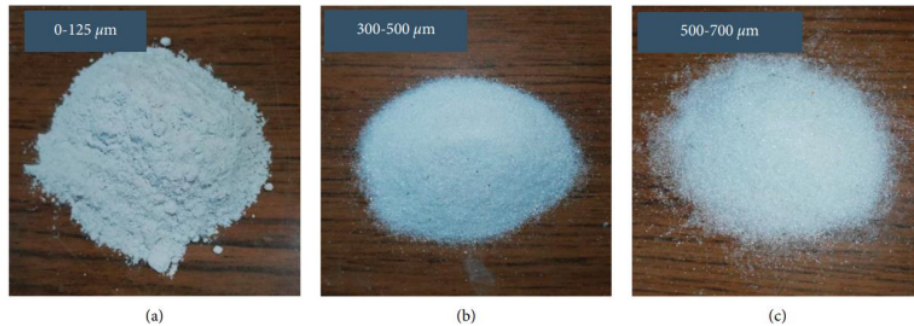
duras condiciones los hacen valiosos en la construcción de infraestructura que requiere un rendimiento a largo plazo y un mantenimiento mínimo. A medida que las prácticas de construcción sostenible ganan terreno, la geopolimerización se destaca como una técnica fundamental para reducir el impacto ambiental de los materiales de construcción (A Aziz et al., 2016).

Los materiales de geopolímero han encontrado aplicaciones en <sup>33</sup> una amplia gama de campos dentro de la industria de la construcción. Se pueden usar para crear elementos estructurales como vigas, columnas y paneles, y ofrecen un rendimiento mejorado en términos de resistencia mecánica y durabilidad. En el ámbito de la infraestructura de transporte, se están explorando materiales a base de geopolímeros para pavimentos de carreteras, donde su resistencia al desgaste, así como a los factores ambientales, los convierten en candidatos prometedores. Además, los compuestos de geopolímero se utilizan en aplicaciones que requieren resistencia a la exposición química, como sistemas de alcantarillado, tanques de almacenamiento industrial y plantas químicas. Además, los materiales basados en geopolímeros han mostrado potencial en el dominio de la preservación del patrimonio cultural, donde su compatibilidad con los materiales históricos y su resistencia a la degradación contribuyen a los esfuerzos de restauración (Shamsaei et al., 2021).

Por su parte, el vidrio en polvo, o denominado polvo de vidrio, es una forma de vidrio finamente fragmentada que resulta de la molienda o trituración mecánica metódica de los materiales de vidrio. Este proceso consiste en reducir objetos de vidrio, láminas o cascos de vidrio en partículas diminutas, que se caracterizan por su tamaño diminuto que va desde micrómetros hasta milímetros. La composición del polvo de vidrio refleja la de su forma de vidrio original, con los mismos componentes químicos presentes en estado granulado y fragmentado. La fuente de polvo de vidrio puede abarcar varios tipos de vidrio, desde cal sodada hasta borosilicato o incluso vidrios especiales, adaptados a aplicaciones específicas y características deseadas (Khatib et al., 2012).

**Figura 3**

Polvo de vidrio de desechos: <sup>26</sup> (a) 0–125  $\mu\text{m}$ , (b) 300–500  $\mu\text{m}$  y (c) 500–700  $\mu\text{m}$  (Najaf y Abbasi, 2022)



Las propiedades exhibidas por el polvo de vidrio abarcan un amplio espectro, que surge tanto de su composición química como de la naturaleza de sus partículas finamente divididas. Conservando los atributos inherentes del vidrio, el polvo de vidrio posee propiedades tales como transparencia, refractividad y aislamiento eléctrico. Su tamaño de partícula fina produce un área de superficie significativamente mayor, lo que promueve una mayor reactividad y garantiza una mezcla perfecta con otros materiales. Dependiendo del tipo de vidrio original, el polvo de vidrio puede manifestar diversas propiedades físicas y térmicas, que abarcan puntos de fusión, coeficientes de expansión térmica y resistencias mecánicas. Además, la flexibilidad para personalizar <sup>29</sup> la distribución del tamaño de las partículas y la composición química del polvo de vidrio lo hace adaptable para aplicaciones precisas y funcionalidades personalizadas (Khalil et al., 2018).

Su importancia repercute en una multitud de industrias, principalmente debido a su versatilidad y características distintivas. Dentro del dominio de la construcción, el polvo de vidrio sirve como material cementoso complementario, contribuyendo a la formulación de concreto de alto rendimiento con mayor durabilidad, permeabilidad reducida y trabajabilidad mejorada. Su potencial para utilizar vidrio de desecho como materia prima no solo se alinea con las prácticas sostenibles mediante el reciclaje de vidrio desechado, sino que también frena la demanda de recursos vírgenes. Además, el polvo de vidrio tiene relevancia en campos como la cerámica, las pinturas, los revestimientos y la electrónica, donde las

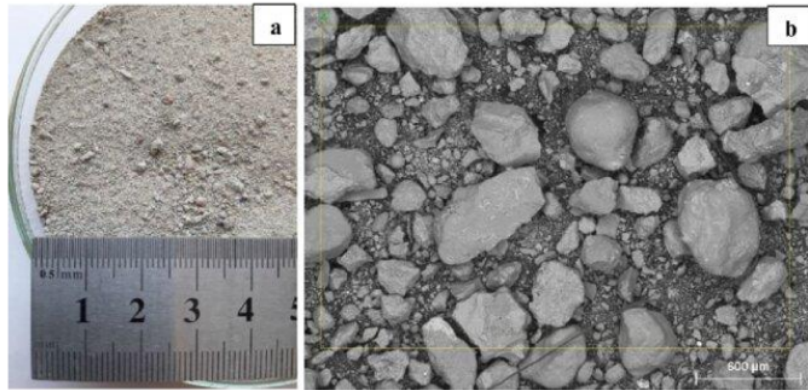
dimensiones de sus partículas y los atributos químicos se pueden ajustar con precisión para aumentar las cualidades de los materiales, elevar los acabados superficiales y conferir funcionalidades especializadas.

El polvo de vidrio ocupa una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. <sup>3</sup> En el sector de la construcción, asume el papel de un material puzolánico, participando en reacciones con hidróxido de calcio dentro del cemento para generar compuestos cementicios suplementarios. Esta infusión aumenta los atributos del concreto que abarcan la fuerza y la resistencia, fomentando así elementos estructurales sostenibles y de alto rendimiento. La reactividad química intrínseca del polvo de vidrio también sustenta la producción de materiales especializados a base de vidrio y vitrocerámicas, incluidos los esmaltes cerámicos y los revestimientos aislantes térmicos. Dentro de los contextos artísticos y creativos, el polvo de vidrio encuentra su propósito en la elaboración de elementos decorativos, obras maestras de vitrales y acabados superficiales innovadores. Además, el ámbito de la electrónica integra polvo de vidrio como material de relleno o dieléctrico, aprovechando sus características aislantes e índices de refracción ajustables para facilitar la fabricación de dispositivos electrónicos avanzados (Kanniyappan y Muthukumaran, 2022).

Por último, tenemos a el otro material conglomerante, concreto reciclado, el cual representa un enfoque transformador en la industria de la construcción, que implica la recuperación y reutilización de materiales de concreto desechados o demolidos. Este proceso engloba la recolección, trituración y procesamiento <sup>12</sup> de residuos de concreto obtenidos de estructuras que han llegado al final de su ciclo de vida, obras de construcción o proyectos de demolición. El resultado de este proceso se conoce como agregado de concreto reciclado (RCA), que consiste en partículas de concreto trituradas. Luego, RCA se utiliza como un sustituto ecológico de los agregados vírgenes tradicionales en nuevos proyectos de construcción, lo que contribuye a un ciclo de construcción más sostenible y ambientalmente responsable. La práctica de reciclar concreto se alinea con los principios de la economía circular al extender la vida útil de los materiales que de otro modo se convertirían en desechos y cargarían los vertederos (Prajapati et al., 2023).

#### Figura 4

Concreto reciclado: (a) dimensiones naturales y (b) vista microscópica (Gabrys, 2023)



Las propiedades del concreto reciclado son el resultado de interacciones complejas entre factores como la composición inicial del concreto original, los métodos empleados en el reciclaje y las medidas de control de calidad implementadas. El agregado de concreto reciclado puede retener una porción significativa de las características de resistencia mecánica y durabilidad exhibidas por los agregados vírgenes. Las propiedades específicas del concreto reciclado dependen de factores como el tipo de mezcla de concreto original, la eficacia del proceso de trituración y la presencia de contaminantes. Si bien el concreto reciclado puede exhibir propiedades ligeramente reducidas en comparación con el concreto fresco, el concreto reciclado bien procesado y cuidadosamente seleccionado puede brindar un desempeño estructural satisfactorio. Un aspecto crucial para mantener las propiedades deseadas es la clasificación, trituración y clasificación adecuadas del agregado reciclado para garantizar el cumplimiento de los requisitos de la aplicación prevista (Perumal et al., 2021).

Su importancia se encuentra en la industria de la construcción como modelo de sostenibilidad y gestión responsable de los recursos. En un mundo marcado por una creciente actividad de urbanización y construcción, la eliminación de residuos de concreto surge como un importante desafío ambiental. Al reciclar el concreto, se desvían cantidades sustanciales de desechos de los vertederos, lo que reduce el impacto ambiental negativo de la acumulación de desechos. Además, la dependencia del concreto reciclado ayuda a mitigar la demanda de agregados vírgenes frescos, un proceso intensivo en recursos que implica consumo de energía y alteración del medio ambiente. La producción de concreto reciclado

suele generar menos <sup>49</sup> emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la fabricación de concreto tradicional, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático. La incorporación de concreto reciclado en las prácticas de construcción representa una postura proactiva hacia la reducción de residuos, la conservación de energía y las prácticas de construcción ecológicas (Martinez et al., 2015).

Las aplicaciones del concreto reciclado abarcan un amplio espectro, arraigando la sostenibilidad en varios sectores <sup>55</sup> de la industria de la construcción. En la construcción de carreteras, el agregado de concreto reciclado se puede emplear como material base o subbase, fortaleciendo la capacidad de carga de las carreteras y reduciendo la necesidad de agregados vírgenes. En la construcción de edificios, encuentra un propósito como agregado en nuevas mezclas de concreto para componentes no estructurales como aceras, pavimentos y cimientos. Además, el concreto reciclado puede servir como material de relleno para la recuperación de tierras y el desarrollo del sitio, lo que contribuye a la utilización efectiva de la tierra. Al adoptar el concreto reciclado en estas aplicaciones, el sector de la construcción no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también alivia la presión sobre los recursos naturales y minimiza las perturbaciones ambientales vinculadas a la extracción tradicional de áridos (Martinez et al., 2015).



## II. METODOLOGÍA

### 2.1. Enfoque y tipo

Esta investigación fue de tipo aplicada según su finalidad, ya que se enfocó en resolver una problemática real. Investigando la influencia del polvo de vidrio en las propiedades físico-químicas y mecánicas de morteros mixtos geopolimerizados a base de concreto reciclado. Por lo cual, se tuvo una clara aplicación práctica al buscar comprender cómo la adición de polvo de vidrio puede afectar las propiedades de los morteros geopolimerizados elaborados a partir de concreto reciclado. Al estudiar esta relación, la investigación pudo proporcionar información valiosa sobre los posibles beneficios y limitaciones del uso de polvo de vidrio en prácticas de construcción sostenible, lo que abordó directamente la necesidad práctica de materiales de construcción ecológica.

También fue de tipo explicativa según su profundidad, ya que se comprendieron las relaciones entre las variables y los fenómenos. Explorando la conexión entre la adición de polvo de vidrio y las propiedades físico-químicas y mecánicas de los morteros geopolimerizados a base de concreto reciclado. Se buscó explicar cómo cambian estas propiedades cuando se introduce dicho polvo de vidrio. Yendo más allá de simplemente observar una correlación, profundizando en los mecanismos no vistos previamente y las razones detrás de los cambios observados. Esta profundidad de análisis caracterizó esta investigación como explicativa.

Como también fue de tipo cuantitativa según su enfoque, ya que implicó la recopilación y análisis de datos numéricos para establecer patrones, relaciones y tendencias: examinando los efectos del polvo de vidrio en las propiedades físico-químicas y mecánicas de los morteros geopolimerizados. Para lograr esto, se realizaron pruebas experimentales que recopilaban datos utilizando métodos que generaron resultados medibles, como pruebas de resistencia a la compresión, densidad, porosidad y otros factores relevantes. El énfasis en recopilar y analizar datos cuantitativos para sacar conclusiones sobre el impacto del polvo de vidrio en las propiedades de estos morteros se alineó con las características de una investigación cuantitativa.

41

### 2.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación fue de tipo experimental, ya que este diseño implica la manipulación deliberada de una variable independiente para observar su efecto sobre

40

variables dependientes, mientras se controlan cuidadosamente otras variables potencialmente influyentes. Teniendo como objetivo principal de establecer relaciones causales entre las variables, buscando determinar si la modificación de la variable causa un cambio en las otras. En esta investigación se utilizó un grupo patrón y grupos experimentales para comparar los resultados y asegurar que cualquier diferencia observada pueda atribuirse a la variable independiente manipulada. Un grupo patrón de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado intacto sin adiciones 0% y un grupo experimental con incorporaciones de 5%, 10 %, 15% y 20% de polvo de vidrio. Resaltando que ambos grupos fueron sometidos a los mismos ensayos experimentales.

46

### 2.3. Objeto de Estudio

**Objeto de Estudio:** El objeto de estudio de esta investigación estuvo conformado por los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.

**Población:** La población de esta investigación estuvo conformada por todos los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado con adición de polvo de vidrio en niveles de estudio diferente.

**Muestra:** La muestra de estudio estuvo conformada por 75 muestras de morteros obtenidos por geopolimerización mixta a base de concreto reciclado con adición de polvo de vidrio en distintos porcentajes, de dimensiones según la norma ASTM C 10 9 de 50x50x50mm. Según la tabla 1, el número total de muestras implicó: el número de variables independientes, el número de 5 repeticiones sugeridos por la norma, numero de 5 niveles de estudio y las 3 edades de ensayo.

**Tabla 1**

*Número total de muestras*

Muestras	Edad de Ensayo			N° total de muestras
	7 días	14 días	28 días	
a1	a1. 7d (5r)	a1. 14d (5r)	a1. 28d (5r)	
a2	a2. 7d (5r)	a2. 14d (5r)	a2. 28d (5r)	
a3	a3. 7d (5r)	a3. 14d (5r)	a3. 28d (5r)	
a4	a4. 7d (5r)	a4. 14 d (5r)	a4. 28d (5r)	
a5	a5. 7d (5r)	a5. 14d (5r)	a5. 28d (5r)	
<b>N° total de muestras</b>	25	25	25	75

### **Niveles de Estudio**

**a1:** 0% de Polvo de Vidrio

**a2:** 5% de Polvo de Vidrio

**a3:** 10 % de Polvo de Vidrio

**a4:** 15% de <sup>3</sup> Polvo de Vidrio

**a5:** 20% de Polvo de Vidrio

**Variable independiente:** Porcentaje de polvo de vidrio (%)

### **Variables dependientes:**

- Esfuerzo de compresión (MPa)
- Densidad (g/cm<sup>3</sup>)
- Porosidad (%)
- Porcentaje de fases amorfas (%)
- Formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H

**Tabla 2**  
*Cuadro de operacionalización de variables*

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Instrumentos	Escala de medición
<b>Variable independiente</b> Porcentaje de polvo de vidrio	Es un polvo extremadamente fino hecho de vidrio molido. Se puede utilizar en una serie de aplicaciones industriales y artesanales y, a menudo, está disponible a través de proveedores de vidrio y suministros industriales. Sus costos varían según el nivel de molienda y las aplicaciones (McMahon, 2023).	Medida de pesos durante el proceso de conformado	%wpv = $(\text{mpv}/\text{ma}) * 100$  %wpv: porcentaje en peso de polvo de vidrio (%) mpv: masa de polvo de vidrio (g) ma: masa de aglomerante (g)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	%
<b>Variable dependiente</b> Esfuerzo de compresión	Es la tensión de compresión máxima que un material puede soportar antes de fallar o fracturarse. Es una medida de cuánta carga puede soportar un material en compresión antes de romperse. Los materiales tienen una resistencia a la compresión mucho más alta en comparación con su resistencia a la tracción (Testbook, 2023).	Registro de carga aplicada versus área de muestra en función del tiempo	$\sigma = F/A$  $\sigma$ : Esfuerzo (MPa) F: Fuerza (N) A: Área ( $\text{mm}^2$ )	Formulario	Nominal	Fichas de observación	MPa
<b>Variable dependiente</b> Densidad	La densidad de una cantidad de materia es su masa dividida por su volumen. Es una propiedad física importante para determinar la flotabilidad de los materiales en los fluidos, así como para comparar materiales y otras medidas (Kurtus, 2022).	Registro de unidad de masa sobre unidad de volumen de muestra	$\rho = m/v$  $\rho$ : Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) m: Masa (g) v: Volumen ( $\text{cm}^3$ )	Formulario	Nominal	Fichas de observación	$\text{g}/\text{cm}^3$

13

Es el espacio vacío en un material. La baja porosidad evita/minimiza la entrada de sustancias corrosivas en sus componentes y, a menudo, se asocia con propiedades mecánicas y magnéticas mejoradas (Horizon Technology, 2019).

$$P = ((pa - pr)/pa) * 100$$

Registro del cociente del volumen de vacíos sobre volumen total de muestra

P: Porosidad (%)  
pa: Densidad aparente sin compactación (g/cm<sup>3</sup>)  
pr: Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)

**Variable dependiente**  
Porosidad

Formulario

Nominal

Fichas de observación

%

Son conjuntos desordenados de átomos o partículas más grandes que, sin embargo, tienen una estructura rígida. Son fases no cristalinas en el que los átomos y las moléculas no están organizados en un patrón reticular definido. (Delgado, 2018).

**Variable dependiente**  
Porcentaje de fases amorfas

Registro de porcentaje de fases de muestra

Registro fotográfico digital de porcentajes

Formulario

Nominal

Fichas de observación

%

Se refiere a los geles "Sodio-Aluminio-Silicato-Hidratado" y "Calcio-Aluminio-Silicato-Hidratado". Es un componente clave en la formación de geopolímeros, que son materiales formados a través de la reacción química de materiales de origen ricos en silicio (Si) y aluminio (Al) con un activador alcalino (Carrasco y Puertas, 2017).

**Variable dependiente**  
Formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H

Registro de transmitancia sobre número de onda de muestra

Registro de diferencia de espectros IR

Formulario

Nominal

Fichas de observación

Espectro FTIR

## <sup>2</sup> 2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos

### 2.4.1. Instrumentos de recojo de datos

El instrumento empleado fueron las fichas de observación directa, las cuales nos ayudaron a recopilar y registrar datos mediante la observación directa de eventos, comportamientos, situaciones o fenómenos. Esta técnica se basa en el hecho de que el observador registra información de manera objetiva y sistemática mientras observa los eventos en tiempo real. Cada ficha se completa durante la observación y puede contener información como: fecha y hora, descripción de situación, participantes, comportamientos o eventos, duración, notas, comentarios, firma del observador, etc (Moultrie, 2016).

De igual forma se emplearon fichas de documentación, siendo un instrumento sistemático que nos ayudó a recopilar y registrar información relevante a partir de diversas fuentes, como libros, artículos, documentos, informes, registros históricos u otros materiales escritos. En este instrumento, se crean fichas o tarjetas individuales para cada pieza de información que se encuentra en la fuente, y estas fichas se organizan de manera que faciliten el acceso, la búsqueda y el análisis posterior (Castro, 2015).

### <sup>1</sup> 2.4.2. Técnicas de recojo de datos

Esta investigación implicó comportamientos, interacciones y fenómenos que fueron ser observados en tiempo real, por lo cual se empleó la técnica de observación directa. Esto permitió capturar detalles y patrones que pudieron no estar disponibles a través de otras fuentes (Moultrie, 2016).

### <sup>1</sup> 2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos

**Máquina universal de ensayo:** esta máquina fue empleada para poder evaluar las propiedades mecánicas de las muestras, en ensayos de compresión.

**Microscopio electrónico de barrido:** este equipo fue empleado para evaluar las propiedades físicas de las muestras, mediante caracterización de porosidad.

**Espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier:** este equipo fue empleado para evaluar las propiedades químicas de las muestras, mediante la caracterización de fases amorfas y la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H.

## 2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de información

### 2.5.1. Técnicas de procesamiento

#### Procedimiento Experimental

- a) En el primer paso, se llevó a cabo la recolección de materiales indispensables para la conformación de las muestras: morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado. Para esto se obtuvieron los materiales áridos como: el concreto reciclado pulverizado previamente pasante por la malla 400 como material conglomerante, los agregados finos como arena gruesa y el polvo de vidrio también pasante por la malla 400. Como también se preparó la solución alcalina de Hidróxido de Sodio de concentración 8M para el proceso de geopolimerización.
- b) En el segundo paso, se conformaron las 75 muestras como se indicó previamente en la muestra de estudio. Cumpliendo parámetros de diseño para morteros geopoliméricos tomada de investigaciones previas. Estos parámetros fueron: una relación a/c de mortero de 0.45 para todas las muestras y una relación conglomerante reciclado/agregado de 2/1 en volumen para todas las muestras. Procediendo así a mezclar todos los materiales áridos.
- c) En el tercer paso, se agregó el último material árido, polvo de vidrio, en distintos porcentajes de 0%, 5%, 10 %, 15% y 20% a la mezcla previa de áridos. De esta forma, las muestras pasaron al proceso de geopolimerización. Añadiendo la solución alcalina de Hidróxido de Sodio a concentración 8M. Se consideró como tiempo de amasado de 10 minutos para cada muestra. Después del tiempo indicado, las muestras se dispersaron en sus respectivos moldes según las dimensiones de la norma ASTM C 10 9. Las muestras se dejaron curar por el tiempo de 24 horas a temperatura ambiente, para posteriormente ser ingresadas a una estufa por 72 horas a 50°C. Por último, las muestras fueron retiradas de dicha estufa y pasaron por un curado final hasta cumplir las edades de 7, 14 y 28 días de ensayo que se propusieron.
- d) En el cuarto paso, se efectuaron tanto los ensayos como los métodos de caracterización. Se realizaron las pruebas físicas como: el ensayo de porosidad y porcentaje de fases amorfas por medio de la microscopia

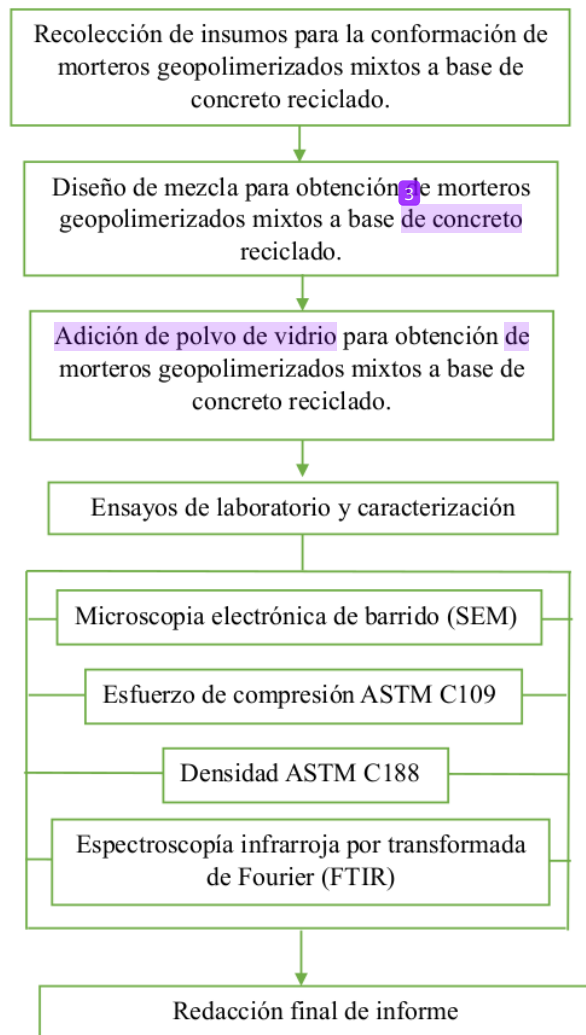
electrónica de barrido SEM y densidad por medio del ensayo ASTM C188. Para después realizar las pruebas destructivas, para evaluar las propiedades mecánicas en el ensayo de compresión ASTM C 10 9, teniendo en cuenta sus parámetros de número de repeticiones (5) y sus parámetros de aleatoriedad. Por último, de realizaron el resto de pruebas químicas, para evaluar las propiedades como geles de tipo N-A-S-H y C-A-S-H por medio del método de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier FTIR.

- e) En el quinto y último paso, los resultados en datos recopilados fueron ingresados a un análisis estadístico de varianza. Para poder validar la significancia entre variables, y así poder generar conclusiones para el informe de la investigación.



**Figura 5**

*Diagrama de flujo del procedimiento experimental*



### **2.5.2. Análisis de Información**

La verificación de los datos obtenidos se llevó a cabo al registrar y organizar de manera efectiva cada uno de los resultados obtenidos durante el proceso experimental. En un principio, aquellos datos se recopilaron en fichas bajo una respectiva organización. Posteriormente, se examinaron estos resultados utilizando herramientas de software de

EXCEL para poder corroborar las tendencias propuestas en las hipótesis. Por último, se sometieron al Análisis de Varianza unidireccional (ANOVA) para poder confirmar si el efecto de la variable independiente tuvo la significancia que se planteó a inicios de la investigación sobre las variables dependientes.

## **2.6. Aspectos éticos en investigación**

### **2.6.1. Honestidad y Transparencia**

La honestidad y transparencia son pilares fundamentales en la investigación científica. Los investigadores deben ser transparentes en cada etapa del proceso, desde la formulación de la pregunta de investigación hasta la presentación de los resultados. Esto implica describir detalladamente los métodos utilizados, los procedimientos de recopilación y análisis de datos, y cualquier cambio significativo en el camino. Si surgen errores o resultados inesperados, es crucial divulgarlos en lugar de ocultarlos. La honestidad también incluye presentar los datos brutos de manera que otros puedan evaluar y verificar los resultados por sí mismos, lo que contribuye a la credibilidad y confiabilidad de la investigación (Smart, 2018).

### **2.6.2. Equidad y Justicia**

La equidad y la justicia son principios éticos que requieren tratar a todos los participantes y sujetos de investigación de manera imparcial y justa. Esto significa evitar cualquier forma de discriminación en la selección de participantes, como género, raza, orientación sexual o nivel socioeconómico. Los investigadores deben esforzarse por reclutar muestras representativas que reflejen la diversidad de la población en estudio. Además, es importante considerar posibles desequilibrios de poder y evitar la explotación de comunidades o grupos vulnerables en la investigación. La equidad y la justicia aseguran que los beneficios y las oportunidades sean distribuidos de manera equitativa (Smart, 2018).

### **2.6.3. Originalidad y Reconocimiento de Fuentes**

La originalidad y el reconocimiento de fuentes son principios esenciales en la investigación científica. Los investigadores deben citar adecuadamente las fuentes de información, datos y trabajos anteriores que hayan influido en su investigación. El plagio, que implica presentar el trabajo de otros como propio, es una violación grave de la ética. Atribuir correctamente las ideas y contribuciones de otros no solo respeta su trabajo, sino que también fortalece la credibilidad y la integridad de la propia investigación (Smart, 2018).

#### **2.6.4. Gestión Responsable de Recursos**

La gestión responsable de recursos implica utilizar de manera eficiente y ética los recursos disponibles. Los investigadores deben planificar cuidadosamente el uso de fondos de investigación, materiales y personal para evitar el desperdicio innecesario. La administración responsable no solo es ética, sino que también demuestra respeto por los fondos otorgados por financiadores, la comunidad científica y la sociedad en general (Smart, 2018).

#### **2.6.5. Integridad en la Presentación de Resultados**

La presentación íntegra de resultados es un aspecto esencial de la ética en la investigación. Los investigadores deben presentar los resultados con exactitud y no seleccionar solo los datos que respalden sus hipótesis. Omitir resultados negativos o discordantes puede distorsionar la interpretación de los hallazgos y socavar la confianza en la investigación. La integridad en la presentación garantiza que la comunidad científica y el público en general obtengan una visión completa y precisa de los resultados (Smart, 2018).

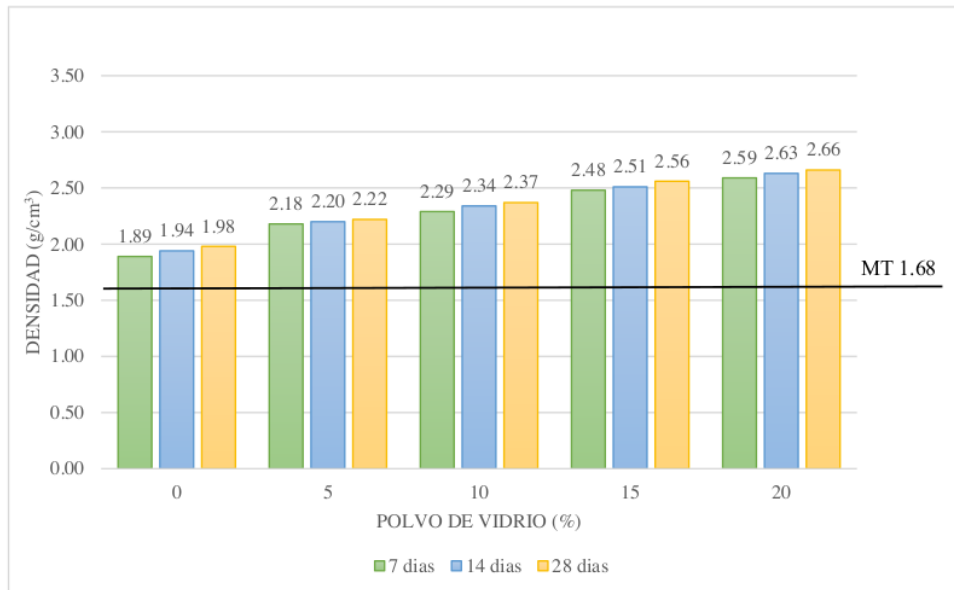
### 9 III. RESULTADOS

#### 3.1. Descripción de resultados

##### 3.1.1. Influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

Figura 6

Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado



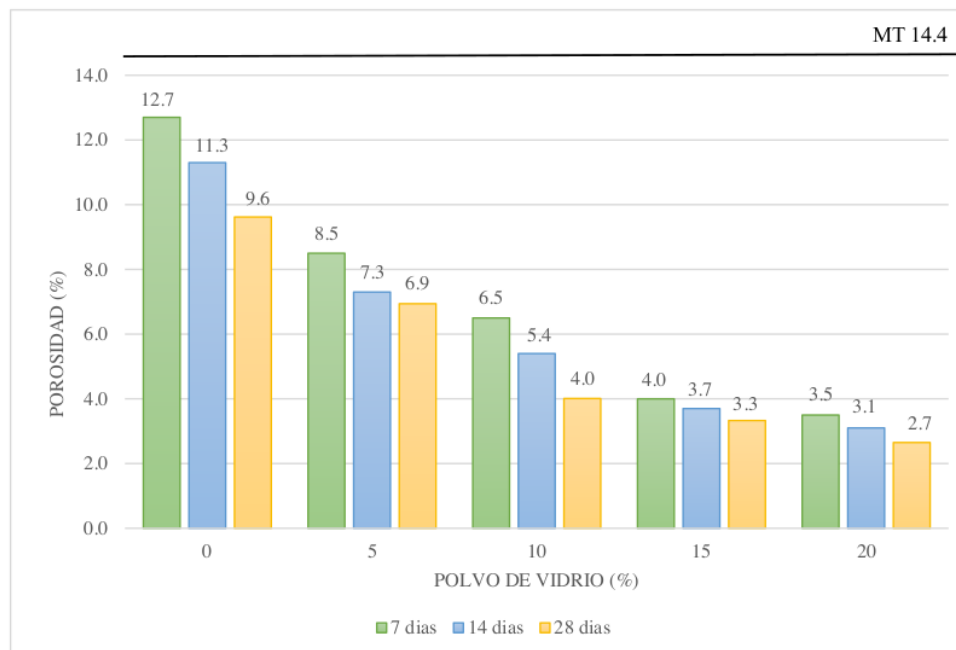
La figura presentada, muestra un gráfico de barras sobre la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado. Como eje horizontal (X) tenemos al porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla, con valores 0%, 5%, 10 %, 15%, y 20%. Como eje vertical (Y) tenemos a la densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado correspondientes a cada porcentaje de polvo de vidrio, medida en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). De la misma forma se presentan los datos a través de tres edades de ensayo. Además de incluir una referencia para los morteros tradicionales de cemento a edad completa de 28 días de ensayo, expresada por MT. Con respecto a los resultados obtenidos, se observa una tendencia general en el gráfico: a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla (a lo largo del eje X), la densidad de los morteros geopolimerizados también aumenta (en el eje Y). Alcanzando una

densidad máxima en el nivel 20% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 2.66 g/cm<sup>3</sup>. Al igual que una densidad mínima en el nivel 0% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 1.98 g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, para poder evaluar cómo esta tendencia evoluciona con el tiempo, se marcaron tres edades de ensayo: 7 días, 14 días y 28 días. Para cada uno de los niveles de estudio, de la misma forma, se puede ver cómo la densidad aumenta a medida que aumenta la edad de ensayo. Sin embargo, los resultados obtenidos a través del tiempo no se encuentran alejados en gran medida. Los resultados de referencia de un mortero convencional, 1.68 g/cm<sup>3</sup>, indica que la propiedad física se encuentra muy por debajo de los morteros por proceso de geopolimerización.

### 3.1.2. Influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

**Figura 7**

*Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado*

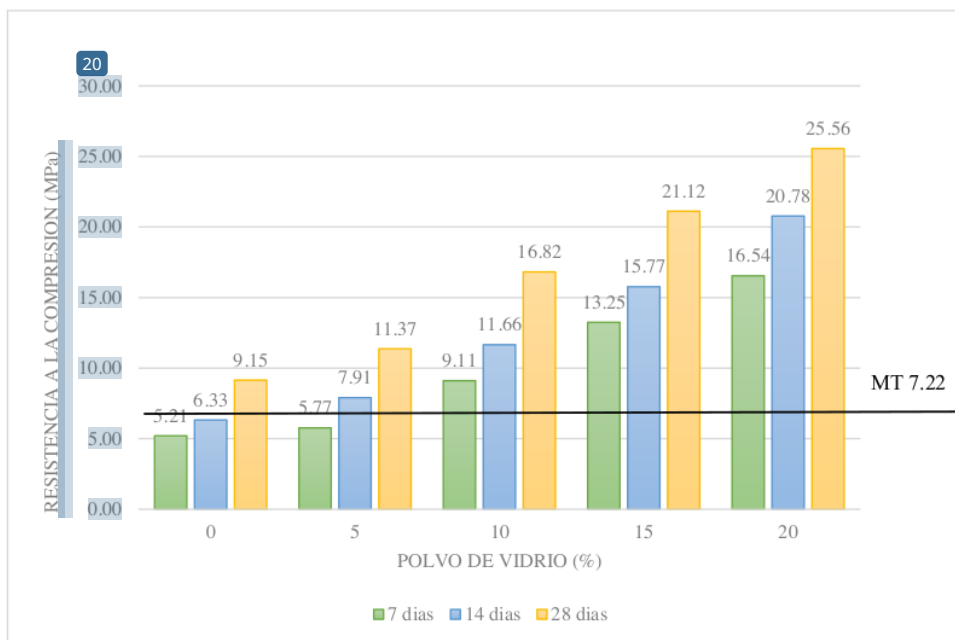


La figura presentada, muestra un gráfico de barras sobre la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado. Como eje horizontal (X) tenemos al porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla, con valores 0%, 5%, 10 %, 15%, y 20%. Como eje vertical (Y) tenemos a la porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado correspondientes a cada porcentaje de polvo de vidrio, medida en porcentaje (%). De la misma forma se presentan los datos a través de tres edades de ensayo. Además de incluir una referencia para los morteros tradicionales de cemento a edad completa de 28 días de ensayo, expresada por MT. Con respecto a los resultados obtenidos, se observa una tendencia general en el gráfico: a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla (a lo largo del eje X), la porosidad de los morteros geopolimerizados disminuye (en el eje Y). Alcanzando una porosidad mínima en el nivel 20% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 2.7%. Al igual que una porosidad máxima en el nivel 0% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 9.6%. Por otro lado, para poder evaluar cómo esta tendencia evoluciona con el tiempo, se marcaron tres edades de ensayo: 7 días, 14 días y 28 días. Para cada uno de los niveles de estudio, de forma inversa, se puede ver cómo la porosidad disminuye a medida que aumenta la edad de ensayo. Sin embargo, los resultados obtenidos a través del tiempo no se encuentran alejados en gran medida en los porcentajes mayores como a niveles 15% y 20%. A diferencia de los porcentajes menores como a niveles 0%, 5% y 10 %. Los resultados de referencia de un mortero convencional, 14.4 %, indica que la propiedad física se encuentra muy por encima de los morteros por proceso de geopolimerización.

### 3.1.3. Influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

Figura 8

Gráfico de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado



La figura presentada, muestra un gráfico de barras sobre la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado. Como eje horizontal (X) tenemos al porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla, con valores 0%, 5%, 10 %, 15%, y 20%. Como eje vertical (Y) tenemos a la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado correspondientes a cada porcentaje de polvo de vidrio, medida en mega pascales (MPa). De la misma forma se presentan los datos a través de tres edades de ensayo. Además de incluir una referencia para los morteros tradicionales de cemento a edad completa de 28 días de ensayo, expresada por MT. Con respecto a los resultados obtenidos, se observa una tendencia general en el gráfico: a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla (a lo largo del eje X), la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados también aumenta (en el eje Y). Alcanzando una resistencia a la compresión máxima en el

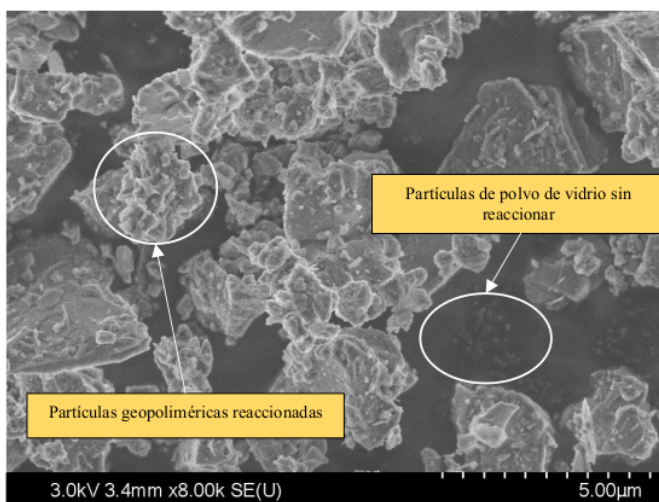
nivel 20% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 25.56 MPa. Al igual que una resistencia a la compresión mínima en el nivel 0% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo de 9.15 MPa. Por otro lado, para poder evaluar cómo esta tendencia evoluciona con el tiempo, se marcaron tres edades de ensayo: 7 días, 14 días y 28 días. Para cada uno de los niveles de estudio, de la misma forma, se puede ver cómo la resistencia a la compresión aumenta a medida que aumenta la edad de ensayo. Evidenciando cambios mayores entre edades 14 a 28 días. Los resultados de referencia de un mortero convencional, 7.22 MPa, indica que la propiedad mecánica se encuentra muy por debajo de los morteros por proceso de geopolimerización.



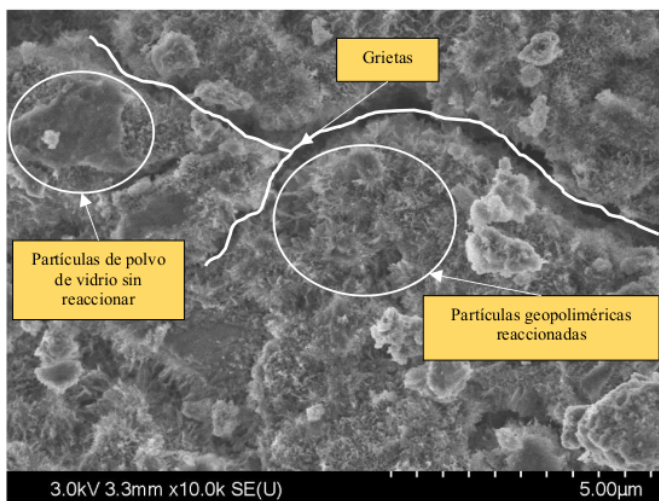
### 3.1.4. Influencia de polvo de vidrio sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

**Figura 9**

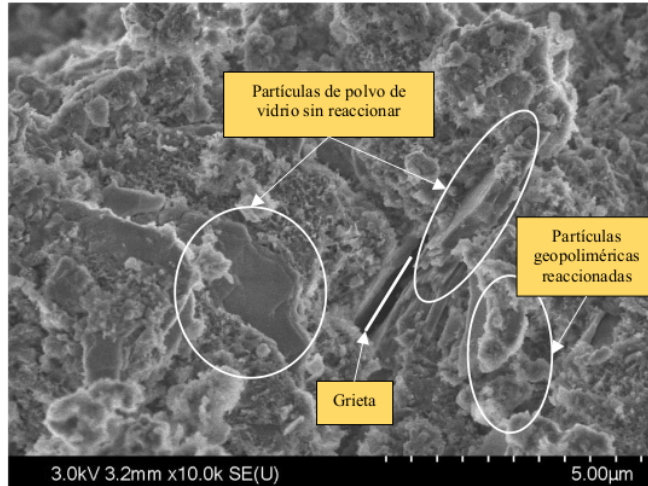
Micrografías SEM de muestras de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado con adición de polvo de vidrio en porcentajes: a) M5%, b) M 10 %, c) M15% y d) M20%



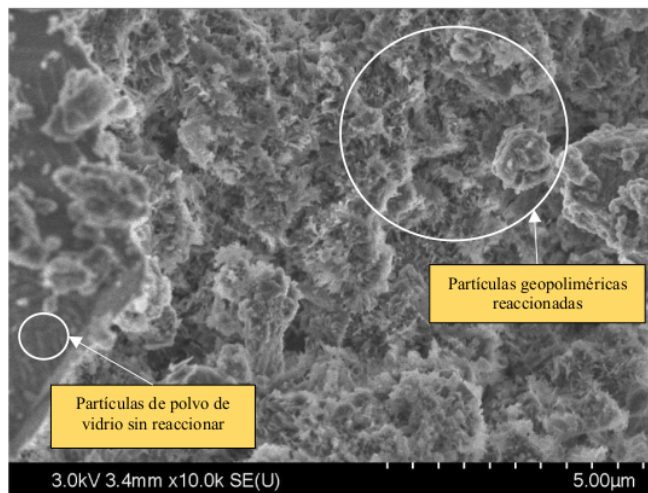
a)



b)



c)



d)

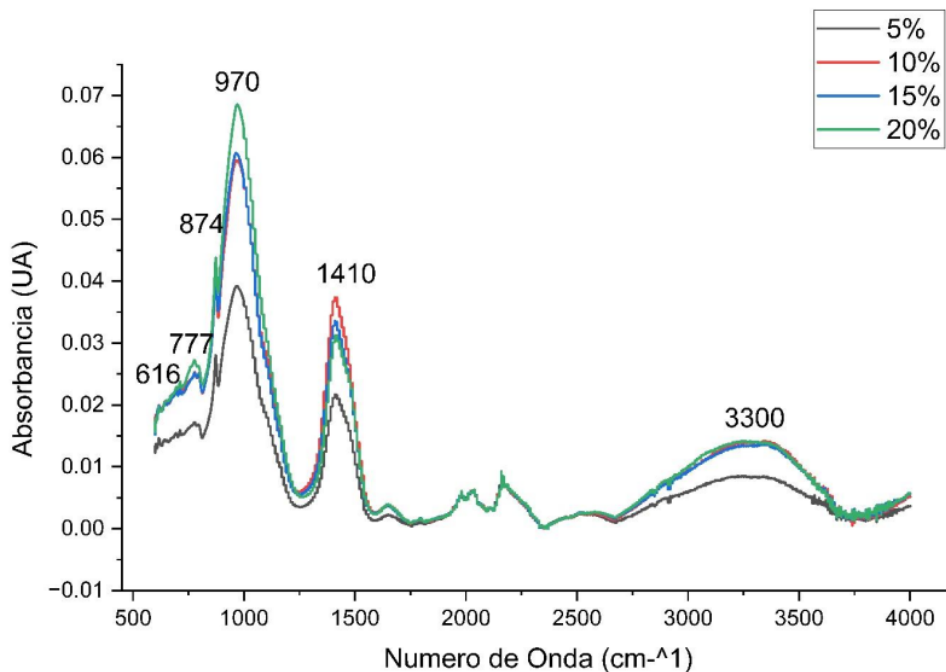
La figura presentada, muestra las micrografías SEM que muestran una visión detallada de las muestras de morteros geopolimerizados mixtos que han sido adicionadas con polvo de vidrio en distintas proporciones: a) M5%, b) M 10 %, c) M15%, y d) M20%. Cada imagen revela diferencias notables en la microestructura de los materiales, lo que sugiere que la cantidad de polvo de vidrio añadida desempeña un papel significativo en la textura y la integridad del mortero. La imagen a) (M5%) muestra la micrografía SEM de mortero geopolimerizado mixto a base de concreto reciclado con un 5% de polvo de vidrio como adición. En la imagen, se pueden apreciar grandes regiones lisas de color oscuro,

sugiriendo una superficie relativamente uniforme y sin rugosidades notables. Como también se pueden identificar algunas áreas rugosas de color más claro, aunque en menor cantidad en comparación con las regiones lisas. El estudio SEM proporcionó el valor de 63% de fases amorfas. La imagen b) (M 10 %) muestra la micrografía SEM de mortero geopolimerizado mixto a base de concreto reciclado con un 10 % de polvo de vidrio como adición. En esta micrografía se destacan grandes grietas en la microestructura, lo que sugiere la presencia de fracturas en el material. También se pueden identificar varias regiones lisas de color oscuro sin rugosidades. Al igual que en la imagen a), aquí también se observan regiones rugosas de color más claro, pero en una cantidad regular. El estudio SEM proporcionó el valor de 44% de fases amorfas. La imagen c) (M15%) muestra la micrografía SEM de mortero geopolimerizado mixto a base de concreto reciclado con un 15% de polvo de vidrio como adición. En esta se observa la presencia de una sola grieta en la micrografía, lo que podría indicar una cierta fragilidad del material. También se pueden identificar varias regiones lisas de color oscuro sin rugosidades, aunque en menor cantidad que en las imágenes anteriores. En esta imagen, las regiones rugosas de color más claro son más prominentes y se presentan en una gran cantidad. El estudio SEM proporcionó el valor de 13% de fases amorfas. La imagen d) (M20%) muestra la micrografía SEM de mortero geopolimerizado mixto a base de concreto reciclado con un 20% de polvo de vidrio como adición. Aquí se destaca la ausencia de grietas en la micrografía, lo que sugiere una mayor integridad estructural del material. Se observan muy pocas regiones lisas de color oscuro sin rugosidades en esta imagen. En contraste, las regiones rugosas de color más claro dominan la mayor parte de la micrografía, indicando una superficie más texturizada, posiblemente debido al mayor porcentaje de adición de polvo de vidrio. El estudio SEM proporcionó el valor de 7% de fases amorfas.

### 3.1.5. Influencia de polvo de vidrio sobre la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

**Figura 10**

*Gráfico de espectros FTIR de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado bajo la influencia de polvo de vidrio*



Esta figura presenta los espectros FTIR de los morteros geopoliméricos mixtos a base de concreto reciclado, bajo la influencia de diferentes porcentajes de polvo de vidrio (5%, 10 %, 15%, 20%). En el eje X, se muestra el número de onda expresado en unidades  $\text{cm}^{-1}$ , el cual revela las vibraciones moleculares presentes en la muestra, mientras que en el eje Y se representa la intensidad de absorción de energía en unidades UA. Se observan varios picos significativos en los espectros: un pico alrededor de  $900\text{-}1100 \text{ cm}^{-1}$ ; otro pico en  $700\text{-}900 \text{ cm}^{-1}$ ; un pico en  $600\text{-}800 \text{ cm}^{-1}$ ; y un pico alrededor de  $3400 \text{ cm}^{-1}$ . Estos picos proporcionan información valiosa sobre la composición y la interacción de los materiales en los morteros geopoliméricos, permitiendo un análisis detallado de su estructura química. Por otro lado, notamos que los espectros poseen diferentes niveles de absorbancia. Entre los primeros picos

de menor número de onda desde  $500\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ , vemos que el espectro de 20% posee la mayor absorbancia; luego en el pico alrededor de  $14\ 10\text{ cm}^{-1}$ , el espectro de 10 %; y alrededor de  $3400\text{ cm}^{-1}$  vemos que todos poseen la misma absorbancia menos el espectro de 5%, el cual posee la menor absorbancia.

### 3.2. Prueba de hipótesis

#### 3.2.1. Influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

18  
Figura 11

Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
0	5	9.46	1.892	0.00412	
0.05	5	10.92	2.184	0.00613	
0.1	5	11.43	2.286	0.00518	
0.15	5	12.42	2.484	0.00353	
0.2	5	12.94	2.588	0.00212	

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.480224	4	0.370056	87.7741935	2.16274E-12	2.8660814
Dentro de los grupos	0.08432	20	0.004216			
Total	1.564544	24				

5 En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de edad de ensayo. En primer lugar, se calculó el valor F experimental, el cual representa la relación entre las varianzas de las muestras. Si un valor F es alto, se sugiere que existe una mayor diferencia entre las muestras. Luego, se calculó el valor crítico para F o F teórico. Este valor es el umbral que se debe superar con el valor F calculado para aceptar la hipótesis planteada. Por último, se calculó un valor de probabilidad, el cual representa la probabilidad de obtener un valor F igual o más extremo

que el calculado bajo la suposición de que la hipótesis planteada es verdadera. Si el valor p es menor que el nivel de significancia (alfa, en nuestro caso 0.05), entonces se tendrá evidencia para aceptar la hipótesis planteada. Si es mayor, no se tendrá suficiente evidencia para aceptarla. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 87.78 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $2.16 \times 10^{-12}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.

### Figura 12

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo*

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	9.69	1.938	0.26697
0.05	5	11.01	2.202	0.00442
0.1	5	11.69	2.338	0.00487
0.15	5	12.56	2.512	0.00422
0.2	5	13.13	2.626	0.02073

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.453104	4	0.363276	6.03027788	0.002368863	2.8660814
Dentro de los grupos	1.20484	20	0.060242			
Total	2.657944	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia

que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 6.03 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $2.37 \times 10^{-3}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.

### Figura 13

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo*

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
0	5	9.91	1.982	0.00552	
0.05	5	11.08	2.216	0.00863	
0.1	5	11.84	2.368	0.01162	
0.15	5	12.78	2.556	0.00478	
0.2	5	13.3	2.66	0.00235	

### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.460176	4	0.365044	55.4778116	1.51775E-10	2.8660814
Dentro de los grupos	0.1316	20	0.00658			
Total	1.591776	24				

En la figura <sup>5</sup> presentada, se muestran los resultados estadísticos <sup>6</sup> de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene



como valor F calculado de 55.48 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $1.52 \times 10^{-10}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la densidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.

### 3.2.2. Influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

18

**Figura 14**

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo*

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
0	5	63.67	12.734	0.39388	
0.05	5	42.42	8.484	0.22123	
0.1	5	32.62	6.524	0.23028	
0.15	5	20.16	4.032	0.23167	
0.2	5	17.29	3.458	0.15737	

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	283.258056	4	70.814514	286.830821	2.3603E-17	2.8660814
Dentro de los grupos	4.93772	20	0.246886			
Total	288.195776	24				

5

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de porosidad de los morteros

6

geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 286.83 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $2.36 \times 10^{-17}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.

### Figura 15

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo*

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	56.64	11.328	0.23282
0.05	5	36.5	7.3	0.23525
0.1	5	26.9	5.38	0.475
0.15	5	18.38	3.676	0.17508
0.2	5	15.74	3.148	0.05257

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	219.292096	4	54.823024	234.14234	1.72264E-16	2.8660814
Dentro de los grupos	4.68288	20	0.234144			
Total	223.974976	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 234.14 y un valor crítico para F de 2.87, por lo

que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $1.72 \times 10^{-16}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.

### Figura 16

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo*

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
0	5	47.81	9.562	0.09567	
0.05	5	34.62	6.924	0.04593	
0.1	5	20.01	4.002	0.14707	
0.15	5	16.41	3.282	0.16062	
0.2	5	13.38	2.676	0.05038	

### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	167.2197	4	41.804926	418.32535	5.74992E-19	2.8660814
Dentro de los grupos	1.99868	20	0.099934			
Total	169.21838	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 418.33 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $5.75 \times 10^{-19}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se

tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.

### 3.2.3. Influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

Figura 17

Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	26.03	5.206	0.18188
0.05	5	28.87	5.774	0.09433
0.1	5	45.56	9.112	0.07117
0.15	5	66.25	13.25	0.16865
0.2	5	82.69	16.538	0.08292

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	474.6756	4	118.6689	990.641122	1.11706E-22	2.8660814
Dentro de los grupos	2.3958	20	0.11979			
Total	477.0714	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 990.64 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $1.12 \times 10^{-22}$ , el cual

resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo.

### Figura 18

Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	31.63	6.326	0.22483
0.05	5	39.55	7.91	0.08375
0.1	5	58.28	11.656	0.34598
0.15	5	78.87	15.774	0.33773
0.2	5	103.88	20.776	0.39513

#### ANÁLISIS

#### DE

#### VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	695.54646	4	173.88661	626.65456	1.05478E-20	2.8660814
Dentro de los grupos	5.54968	20	0.277484			
Total	701.09614	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 626.64 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $1.055 \times 10^{-20}$ , el

cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa en la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo.

### Figura 19

Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	45.76	9.152	0.07457
0.05	5	56.85	11.37	0.48075
0.1	5	84.1	16.82	0.16845
0.15	5	105.58	21.116	0.60153
0.2	5	127.79	25.558	0.18152

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	916.537864	4	229.134466	760.324611	1.54899E-21	2.8660814
Dentro de los grupos	6.02728	20	0.301364			
Total	922.565144	24				

En la figura presentada, se muestran los resultados estadísticos de la prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95% y una probabilidad  $\alpha = 0.05$ , sobre la influencia que tiene el polvo de vidrio sobre la propiedad de resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de edad de ensayo. En esta figura, se tiene como valor F calculado de 760.032 y un valor crítico para F de 2.87, por lo que el valor F calculado es mayor. Asimismo, el valor p calculado es de  $1.55 \times 10^{-21}$ , el cual resulta ser menor que el alfa con el que se trabajó de 0.05. Estos hallazgos indican que se

tiene suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis planteada. En otras palabras, los datos sugieren que el polvo de vidrio tiene una influencia significativa <sup>14</sup> en la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo.

#### **3.2.4. Influencia de polvo de vidrio sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado**

La prueba de hipótesis en este caso, no aplica para el análisis de fases amorfas, ya que no se cuentan con resultados cuantitativos para procesar estadísticamente. Ya que este análisis solo se realizó de manera cualitativa, a través de la descripción de micrografías como también aproximando porcentajes por medio de estas mismas. Por lo que realizar una prueba de hipótesis no tendría validez.

#### **3.2.5. Influencia de polvo de vidrio sobre la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado**

La prueba de hipótesis en este caso, no aplica para el análisis de la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H, ya que no se cuentan con resultados cuantitativos para procesar estadísticamente. Ya que este análisis solo se realizó de manera cualitativa, a través de la descripción de espectros FTIR por medio de diferencia de picos de grupos funcionales químicos. Por lo que realizar una prueba de hipótesis no tendría validez.

#### IV. DISCUSIÓN

- La figura 6, mostró los resultados de la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado bajo la influencia de polvo de vidrio. En donde se observó una tendencia general, que a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla en los niveles 0%, 5%, 10 %, 15% y 20%, la densidad de los morteros geopolimerizados también aumenta. Alcanzando la densidad máxima en el nivel 20% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo. Como también la densidad mínima en el nivel 0% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo. Esta tendencia viene a estar netamente vinculada con el aumento del contenido de sílice que otorga el polvo de vidrio. Al poseer un sistema geopolimérico de concentración alta de álcali, se crean cantidades de sílice monomérica provenientes del polvo de vidrio. Dicha forma molecular acelera la disolución de partículas de concreto reciclado y a la vez la formación de geles poliméricos y, en consecuencia, una densidad de mayor compactación (Hajimohammadi et al., 2019). Por otro lado, para cada uno de los niveles de estudio, se pudo ver cómo la densidad aumenta a medida que aumenta la edad de ensayo. Esto es debido a la reacción de hidratación de los componentes en el tiempo. A medida que la reacción progresa, los productos de hidratación contribuyen a una mayor compactación de la matriz del mortero y, por lo tanto, aumentar la densidad (Hajimohammadi et al., 2019).
- Por su parte la figura 7, mostró los resultados de la porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado bajo la influencia de polvo de vidrio. En ella se observó una tendencia, que a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla en los niveles 0%, 5%, 10 %, 15% y 20%, la porosidad de los morteros geopolimerizados disminuye. Alcanzando una porosidad mínima en el nivel 20% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo. Al igual que una porosidad máxima en el nivel 0% de polvo de vidrio a 28 días de ensayo. Como se sabe, la propiedad de porosidad está relacionada inversamente proporcional con la densidad. Por lo que esta reducción de porosidad a altos porcentajes de polvo de vidrio ocurre gracias a la alta densidad obtenida en los morteros polímeros gracias a la formación de sílice monomérica por parte de la adición de polvo de vidrio. Gracias a la formación de estos productos se da como resultado una microestructura densa y poco porosa de la matriz endurecida (Siddika et al., 2021). Por lo que, de



forma inversa, la porosidad disminuye a medida que aumenta la edad de ensayo también al mantener la hidratación alcalina. Lo cual contribuirá en obtener polimerizaciones de mayor eficiencia.

- La figura 9, mostró las micrografías SEM que muestran una visión detallada de las muestras de morteros geopolimerizados mixtos que han sido adicionadas con polvo de vidrio en distintas proporciones. Cada imagen reveló diferencias notables en la microestructura de los materiales, lo que sugirió que la cantidad de polvo de vidrio añadida desempeña un papel significativo en la textura y la integridad del mortero. En la imagen a) (M5%), se pudo apreciar grandes regiones lisas de color oscuro, sugiriendo una superficie relativamente uniforme y sin rugosidades notables. Estas regiones vienen a ser las partículas de polvo de vidrio sin reaccionar. El fundamento detrás de esta apariencia de regiones radica en el bajo porcentaje de adición de polvo de vidrio. Con solo un 5%, la influencia de este material es limitada, lo que da como resultado una superficie relativamente uniforme. Concordando con el resultado del estudio SEM, el cual proporcionó un valor de 63% de fases amorfas. También se pudo identificar algunas áreas rugosas de color más claro, aunque en menor cantidad en comparación con las regiones lisas. Estas regiones vienen a ser las partículas geopoliméricas que si llegaron a reaccionar. La imagen b) (M 10 %) mostró grandes grietas en la microestructura, lo que sugiere la presencia de fracturas en el material. Este fenómeno se debe a un aumento en el porcentaje de polvo de vidrio, lo que hace que el material sea más frágil y propenso a fracturarse. También se pudo identificar varias regiones lisas de color oscuro sin rugosidades. Indicando la presencia de áreas donde la interacción entre el concreto reciclado y el polvo de vidrio es menos evidente. Concordando con el resultado del estudio SEM, que proporcionó el valor de 44% de fases amorfas. Al igual que en la imagen a), aquí también se observan regiones rugosas de color más claro, pero en una cantidad regular. Indicando un gran porcentaje de fases cristalinas por medio de partículas geopoliméricas que si reaccionaron. La imagen c) (M15%) mostró la presencia de una sola grieta en la micrografía, lo que sugiere una menor fragilidad del material debido al aumento del porcentaje de polvo de vidrio. También identificaron varias regiones lisas de color oscuro sin rugosidades, aunque en menor cantidad que en las imágenes anteriores, concordando con el resultado del estudio SEM, que proporcionó el valor de 13% de fases amorfas. En esta imagen, las regiones rugosas de color más claro fueron más

prominentes y se presentaron en gran cantidad debido a una mayor concentración de partículas de vidrio. Por último la imagen d) (M20%) se destacó por la ausencia de grietas en la micrografía, lo que indica una mayor integridad estructural del material gracias al alto contenido de polvo de vidrio. Se observaron también muy pocas regiones lisas de color oscuro sin rugosidades en esta imagen, corroborando con el resultado del estudio SEM, que proporcionó el valor de 7% de fases amorfas. En contraste, las regiones rugosas de color más claro dominan la mayor parte de la micrografía, indicando una superficie más texturizada. Esto se debe al alto porcentaje de adición de polvo de vidrio, lo que conduce a una textura más pronunciada en la superficie del material, sin la fragilidad observada en las muestras con menor adición de polvo de vidrio (Periyasamy et al., 2022). Estas reducciones de fases amorfas al adicionar porcentajes de polvo de vidrio, contribuyen a obtener geopolímeros de mayor consistencia y eficiencia mecánica.

- La figura 10 presenta los espectros FTIR de los morteros geopoliméricos mixtos a base de concreto reciclado, bajo la influencia de los porcentajes de polvo de vidrio (5%, 10 %, 15%, 20%). Se observaron picos significativos en los espectros que proporcionan evidencia de la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H en las muestras: un pico alrededor de  $900-1100\text{ cm}^{-1}$ ; el cual es debido a la presencia del grupo Si-O-Si en los grupos tetraédricos de  $\text{SiO}_4$  que están presentes en la estructura amorfa del polvo de vidrio; así mismo también indica la presencia del grupo Al-O-Si dentro de la estructura tetraédrica  $\text{TO}_4$  (T: Al o Si), la cual es común de un aluminosilicato amorfo; otro pico en  $700-900\text{ cm}^{-1}$ , el cual corresponde a los enlaces O-Si-O en los grupos  $\text{SiO}_4$  y en los silicatos; un pico en  $600-800\text{ cm}^{-1}$ ; correspondiente enlaces Al-O debido a la formación de los enlaces Al-O-Si después del proceso de geopolimerización, estos son comunes en geopolímeros y vidrios de aluminosilicato, ratificando de forma coherente la presencia de geles N-A-S-H y C-A-S-H, ya que estos geles contienen aluminosilicatos en su estructura; un pico alrededor de  $1410\text{ cm}^{-1}$ , el representa a enlaces C-H carbono-hidrógeno en compuestos orgánicos; y un pico alrededor de  $3400\text{ cm}^{-1}$ , el cual corresponde al grupo H-OH que indica el agua absorbida incorporada en la microestructura porosa y posiblemente unida a los productos de reacción de gel de sílice entremezclado, lo que es característico de los geles N-A-S-H y C-A-S-H. (Burciaga et al., 2019). Los geles de tipo N-A-S-H y C-A-S-H son respaldados en este caso mediante los

espectros FTIR, debiéndose a los factores de composición. Como por el ejemplo al contenido de sodio (Na) en la solución de NaOH como agente activador alcalino, siendo este un componente esencial en la estructura de estos geles. También debido al contenido de calcio (Ca) presente en el concreto reciclado, por iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Este es un componente común en el concreto debido a su presencia en los compuestos de cemento, como el clínker de Portland, que se utiliza en la fabricación de concreto. Adicionalmente, a los precursores aluminosilicatos como el polvo de concreto reciclado y el polvo de vidrio, ya que son fuentes de aluminosilicatos, que son precursores necesarios para la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H. Por último, también a la concentración de la solución de NaOH, ya que al tenerla altamente concentrada (8 molar) proporciona un entorno altamente alcalino que es propicio para la formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H (Burciaga et al., 2019). Por otro lado, notamos que los espectros poseen diferentes niveles de absorbancia. Entre los primeros picos de menor número de onda desde  $500\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ , se vio que el espectro de 20% posee la mayor absorbancia; indicándonos que las muestras a este porcentaje poseen mayor intensidad de enlaces O-Si-O, Al-O-Si y Al-O, los cuales son fundamentales para la obtención de un geopolímero de alta resistencia mecánica.

- Por último, la figura 8, mostró los resultados de resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado bajo la influencia de polvo de vidrio. En ella se observó una tendencia directamente proporcional con los resultados de densidad. Es decir, que a medida que aumenta el porcentaje de polvo de vidrio en la mezcla en los niveles 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, la resistencia a la compresión de los morteros geopolimerizados también aumenta. Alcanzando como resistencia a la compresión máxima en el nivel 20% a 28 días de ensayo. Al igual que una resistencia a la compresión mínima en el nivel 0% a 28 días de ensayo. El motivo por el que ocurre esta tendencia es debido el alto contenido en formación de silicatos solubles, gracias a la solubilidad del polvo de vidrio, un material amorfo, en sistemas alcalinamente altos de pH superior a 10.7. Al polimerizar junto con los precursores amorfos de aluminosilicato encontrados en los polvos de concreto reciclado, se forman productos de reacción de alta resistencia (Burciaga et al., 2019). Al igual como se vio en las discusiones superiores, la resistencia mecánica se encuentra ligada a las propiedades físicas como densidad y porosidad. Al obtener morteros de mayor compactación, esto genera muestras con menores porosidades. Por ende, al

someterlas bajo cargas compresivas, se obtienen morteros de buena eficiencia mecánica al poseer defectos menores (Burciaga et al, 2012).

## V. CONCLUSIONES

- 1 En esta investigación, se logró determinar la influencia del polvo de vidrio en las propiedades físico-químicas y mecánicas de los morteros geopolimerizados mixtos elaborados a partir de concreto reciclado. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre cómo la adición de este material impacta en la calidad y el rendimiento de los morteros geopolimerizados mixtos.
- Se pudo determinar la densidad y porosidad de los morteros geopolimerizados mixtos. Los resultados revelaron que la adición de polvo de vidrio tuvo un efecto significativo en la densidad y porosidad de los morteros, mostrando variaciones notables en comparación con las muestras de control sin polvo de vidrio. Estas diferencias en la densidad y porosidad sugieren una influencia directa del polvo de vidrio en la compactación y la estructura de los morteros. Obteniendo mayores densidades y menores porosidades, al aumentar el porcentaje de polvo de vidrio. A través del método de caracterización SEM, se analizó la morfología de los morteros geopolimerizados mixtos. Los resultados demostraron cambios positivos en la microestructura y la distribución de partículas cuando se incorporó polvo de vidrio de forma creciente en el rango de 5% a 20%. Esto indica que la presencia de polvo de vidrio influye en la microestructura y las características del mortero geopolimerizado mixto, y cómo esto es crucial para comprender su comportamiento y durabilidad en diversas aplicaciones.
- La caracterización de los grupos funcionales de los morteros geopolimerizados mixtos se realizó mediante el método FTIR. Los resultados revelaron cambios en la composición química de los materiales debido a la inclusión de polvo de vidrio. Estos cambios están relacionados con la formación de geles de tipo N-A-S-H y C-A-S-H, desempeñando un papel clave en la formación y la cohesión de matriz de geopolímero, lo que resulta en la mejora de la resistencia y durabilidad de estos morteros geopoliméricos.
- 5 Los ensayos de esfuerzo de compresión de acuerdo con la norma ASTM C 10 9 proporcionaron datos importantes sobre la resistencia mecánica de los morteros geopolimerizados mixtos. 15 Los resultados indicaron que la incorporación de polvo de vidrio afecta positivamente la resistencia a la compresión de los morteros, lo que sugiere que este material puede ser beneficioso para mejorar la capacidad de carga de las estructuras construidas con estos morteros. 28

## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis detallado del comportamiento químico del polvo de vidrio en la mezcla, incluyendo su reactividad con los materiales geopoliméricos y cómo afecta a la formación de la matriz geopolimérica.
- Investigar y cuantificar los beneficios ambientales de utilizar <sup>4</sup> polvo de vidrio <sup>4</sup> reciclado en la producción de morteros geopoliméricos, incluyendo la reducción de residuos y la huella de carbono.
- Realizar comparaciones con otros tipos de adiciones, como polvo de ceniza volante o sílice, para determinar cuál proporciona las mejores propiedades en morteros geopoliméricos mixtos.
- Ampliar las pruebas mecánicas para incluir resistencia a la flexión y tracción <sup>64</sup> para obtener una visión más completa de las propiedades mecánicas <sup>64</sup> de los morteros geopoliméricos mixtos.
- Realizar un <sup>54</sup> análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental completo <sup>54</sup> de los morteros geopoliméricos mixtos con polvo de vidrio, desde la producción hasta el fin de su vida útil.
- Explorar aplicaciones específicas en las que el polvo de vidrio pueda tener ventajas particulares.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A Aziz, Ikmal & Abdullah, Mohd Mustafa Al Bakri & Yong, Heah & Ming, Liew & Kamarudin, H. & Abdul Kadir, Kadir & Azimi, Emy Aizat. (2016). *Manufacturing of Fire Resistance Geopolymer: A Review*. MATEC Web of Conferences. 78. 0 10 23. 10 . 10 51/mateconf/2016780 10 23.
- Atoyebi, Olumoyewa & Iwuozor, Kingsley & Emenike, Ebuka & Anamayi, David & Adeniyi, Adewale. (2023). *Physical and mechanical properties of locally fabricated geopolymer-plastic ceiling boards*. Results in Engineering. 19. 10 . 10 16/j.rineng.2023. 10 1230.
- Bahrami, A., Ozkılıc, Y. O., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Kılıc, A. (2023). *Use of waste glass powder toward more sustainable geopolymer concrete*. Journal of Materials Research and Technology, 24, 8533-8546. [https://doi.org/ 10 . 10 16/j.jmrt.2023.05.094](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.094)
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2012). *Informe anual 2012*. Recuperado de : <https://publications.iadb.org/es/publicacion/17499/banco-interamericano-de-desarrollo-informe-anual-2012-estados-financieros>
- Burciaga-Díaz, Oswaldo & Durón-Sifuentes, M. & Díaz-Guillén, José & Escalante-García, J Ivan. (2019). *Effect of waste glass incorporation on the properties of geopolymers formulated with low purity metakaolin*. Cement and Concrete Composites. 10 7. 10 3492. 10 . 10 16/j.cemconcomp.2019. 10 3492.
- Burciaga-Díaz, Oswaldo & Escalante-García, J Ivan & Gorokhovskiy, Alexander. (2012). *Geopolymers Based on a Coarse Low-Purity Kaolin Mineral: Mechanical Strength as a Function of the Chemical Composition and Temperature*. Cement and Concrete Composites. 34. 18-24. 10 . 10 16/j.cemconcomp.2011.08.001.
- Carrasco, Manuel & Puertas, F.. (2017). *Alkaline activation of aluminosilicates as an alternative to Portland cement: A Review*. Revista Romana de materiale = Romanian journal of materials = RRM. 47. 3-15.
- Castro, A. (2015). *Recolección de datos: Fichas*. Recuperado de: [https://docplayer.es/3 10 47267-Recoleccion-de-datos-fichas.html](https://docplayer.es/31047267-Recoleccion-de-datos-fichas.html)
- Choca, I., (2021). *Influencia del Polvo de Vidrio en las Propiedades del Concreto en Estado Fresco y Endurecido*. Universidad Peruana Los Andes. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/2813>
- Cuffari, B. (2019). *The Applications of Mortar in Construction*. Azo Build. Recuperado de: <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8344>
- De la Villa, R.; Frías, M.; Martínez, S.; Fernández, L. y García, R. (2022). *Concrete/Glass Construction and Demolition Waste (CDW) Synergies in Ternary Eco-Cement-Paste Mineralogy*. [https://doi.org/ 10 .3390/ma15134661](https://doi.org/10.3390/ma15134661)

- Delgado, E. (2018). *Constructing a Theory for Amorphous Solids*. Recuperado de: <https://physics.aps.org/articles/v11/88>
- Gabrys, Katarzyna. (2023). *Experimental research on compressibility characteristics of recycled concrete aggregate: recycled tire waste mixtures*. Journal of Material Cycles and Waste Management. 25. 10.1007/s10163-023-01694-9.
- Hajimohammadi, A., Ngo, T., & Vongsvivut, J. (2019). Interfacial chemistry of a fly ash geopolymer and aggregates. Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.249
- Hashmie, N., Gunagi, P., Belagal, P. y Manoharan, S. (2020). *Utilisation of Recycled Glass Powder for the Stabilization of Black Cotton soil by Alkali Activation*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 955. 012063. 10.1088/1757-899X/955/1/012063.
- Horizon Technology. (2019). *ADDRESSING POROSITY IN POWDER METALLURGY*. Recuperado de: <https://www.horizontechnology.biz/blog/porosity-in-powder-metallurgy>
- Jiang, X., Xiao, R., Ma, Y., Zhang, M., Bai, Y., & Huang, B. (2020). *Influence of waste glass powder on the physico-mechanical properties and microstructures of fly ash-based geopolymer paste after exposure to high temperatures*. Construction and Building Materials, 262, 120579. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120579
- Kanniyappan, S P & Muthukumar, T. (2022). *A Study on Glass Powder Waste as Partial Replacement of Cement for Sustainable Development*. 5. 449-458.
- Khalil, Asmaa & Mahmoud, M & AL-Hathal, A & Jawad, Mohammed & Mozahim, B. (2018). *The effect of replaced recycled glass on thermal conductivity and compression properties of cement*. Journal of Physics: Conference Series. 1003. 012127. 10.1088/1742-6596/1003/1/012127.
- Khatib, Jamal & Negim, El-Sayed & Sohl, H.S. & Chileshe, Nicholas. (2012). *Glass powder utilisation in concrete production*. European Journal of Applied Sciences. 4. 98-100. 10.5829/idosi.ejas.2012.4.3.1102.
- Kurtus, R. (2022). *Density of Matter*. School for Champions. Recuperado de: <https://www.school-for-champions.com/science/density.htm>
- Lopez, S., Fajardo, C. (2022). *Elaboración de bloques de concreto f'c 75 kg/cm2 adicionando polvo de vidrio de colores reciclado para reducir la emisión de CO2 generado por la producción de cemento*. Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <http://hdl.handle.net/10757/660938>
- Menegaki M., Damigos D. (2018). *Una revisión sobre la situación actual y los desafíos de la gestión de residuos de construcción y demolición*. actual Opinión Sostenido verde. Química. 13 :8–15. doi: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010.



- Moultrie, J. (2016). *Direct observation*. Recuperado de: <https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/research/dmg/tools-and-techniques/direct-observation/>
- Najaf, Erfan & Abbasi, Hassan. (2022). *Using Recycled Concrete Powder, Waste Glass Powder, and Plastic Powder to Improve the Mechanical Properties of Compacted Concrete: Cement Elimination Approach*. *Advances in Civil Engineering*. 2022. 1-12. 10.1155/2022/9481466.
- Nayana, A. y Rakesh, P. (2018). *Strength and durability study on cement mortar with ceramic waste and micro-silica*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.276>
- Papargyropoulou E., Preece C., Padfield R., Abdullah AA. (2011). *Gestión sostenible de residuos de construcción en Malasia: la perspectiva de un contratista*; Actas de la Gestión e Innovación para un Entorno Construido Sostenible MISBE. Ámsterdam, Países Bajos.
- Periyasamy, M., Natrayan, L., Duraimurugan, S. y Venkatesan, V. (2022). *Influence of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Precursor in Synthesizing Ternary Blended Alkali-Activated Binder*. *Silicon*. 14. 1-10. 10.1007/s12633-021-01533-2.
- Prajapati, Rohit & Amadi, Ichebadu & Kosuri, Mamatha & Kahabi, Neema & V G, Ram & Basavaraj, Anusha & Dhandapani, Yuvaraj & Kanjee, Janina & Selvam, M. & Santhanam, Manu & Alexander, Mark & Ballim, Yunus & Gettu, Ravindra & Beushausen, Hans. (2023). *Recycled concrete aggregates and their influence on concrete properties*. 10.13140/RG.2.2.36843.41764.
- Purchase, C.; Al, D.; O'Brien, B.; Kowalewski, M.; Berenjjan, A.; Hossein, A y Seifan, M. (2021). *Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits*. doi: 10.3390/ma15010076
- Rondinel, D. (2023). *Construction and Demolition Waste in Peru - an Interview*. Recuperado de: <https://greentechknowledgehub.de/news/construction-and-demolition-waste-peru-interview>
- Samarakoon, M. y Ranjith, P. (2021). *Role of Waste Glass Powder in Fly ash/slag-based Alkali-activated Binders*.
- Sandoval, C., (2019). *Resistencia a compresión de mortero con cemento sustituido al 9% y 18 % de la combinación de Polvo de Vidrio y Ceniza de Concha de Abanico*. Tesis, Universidad San Pedro. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8010>
- Shamsaei, Ezzatollah & Bolt, Owen & Souza, Felipe & Benhelal, Emad & Sagoe-Crentsil, Kwesi & Sanjayan, Jay. (2021). *Pathways to Commercialisation for Brown Coal Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in Australia*. *Sustainability (Switzerland)*. 13. 10.3390/su13084350.

- Siddika, A., Hajimohammadi, A., Ferdous, W & Sahajwalla, V. (2021). *Roles of Waste Glass and the Effect of Process Parameters on the Properties of Sustainable Cement and Geopolymer Concrete—A State-of-the-Art Review*. [https://doi.org/ 10.3390/polym13223935](https://doi.org/10.3390/polym13223935)
- Singh, R. J., Raut, A., Murmu, A. L., & Jameel, M. (2021). *Influence of Glass Powder Incorporated Foamed Geopolymer Blocks on Thermal and Energy Analysis of Building Envelope*. *Journal of Building Engineering*, 43, 10 2520. doi: 10.1016/j.jobe.2021.10.2520
- Smart, J. (2018). *Ethical considerations in research and evaluation with children and young people*. Recuperado de: <https://aifs.gov.au/resources/practice-guides/ethical-considerations-research-and-evaluation-children-and-young-people>
- Testbook. (2023). *Compressive Stress: Learn its Definition, Formula, Unit and Examples with FAQs*. Recuperado de: <https://testbook.com/physics/compressive-stress>
- Warren, S. (2020). *GUIDE TO CONCRETE CONSTRUCTION*. Cement concrete & aggregates Australia. Recuperado de: [https://ccaa.com.au/common/Uploaded%20files/CCAA/Publications/Technical%20Publications/Complete\\_Guide\\_to\\_Concrete\\_Construction\\_2020\\_Edition.pdf](https://ccaa.com.au/common/Uploaded%20files/CCAA/Publications/Technical%20Publications/Complete_Guide_to_Concrete_Construction_2020_Edition.pdf)
- Yan, Bingqian & Kouame, Kouame Joseph Arthur & Lv, Wensheng & Yang, Peng & Cai, Meifeng. (2018). *Modification and in-place mechanical characteristics research on cement mortar with fly ash and lime compound admixture in high chlorine environment*. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2018.10.011.
- Yeheyis M., Hewage K., Alam MS, Eskicioglu C., Sadiq R. (2013). *Una descripción general de la gestión de residuos de construcción y demolición en Canadá: un enfoque de análisis del ciclo de vida para la sostenibilidad*. *Tecnología limpia*. Reinar. Política.15 :81–91. doi: 10.1007/s10098-012-0481-6.

# **ANEXOS**

**1** Anexo I: Matriz de consistencia

TÍTULO	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
INFLUENCIA DEL POLVO DE VIDRIO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS GEOPOLIMERIZADOS MIXTOS A BASE DE CONCRETO RECICLADO?	¿Cuál es la influencia del polvo de vidrio sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado?	<p><b>Hipótesis General</b> El incremento del porcentaje de polvo de vidrio modifica las propiedades físico-químicas y mecánicas geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>El incremento del porcentaje de polvo de vidrio en el rango de 5% a 20%, modifica la composición química; <b>10</b> incrementa la formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.</li> </ul>	<p><b>Objetivo General</b> Determinar la influencia del polvo de vidrio sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar las propiedades físicas en densidad y caracterización microscópica de la morfología de los morteros geopolimerizados mixtos mediante ensayos estándar, ASTM C188 y método de caracterización SEM.</li> <li>Determinar las propiedades químicas de los grupos funcionales resultantes de los morteros geopolimerizados mixtos mediante método de caracterización FTIR.</li> </ul>	<p><b>Variable Independiente</b> Porcentaje de polvo de vidrio</p> <p><b>Variables dependientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Esfuerzo de compresión</li> <li>Densidad</li> <li>Porosidad</li> <li>Porcentaje de fases amorfas</li> <li>Formación de geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H</li> </ul>	<p><math>\sigma</math>: Esfuerzo (MPa)</p> <p><math>\rho</math>: Densidad (g/mm<sup>3</sup>)</p> <p>P: Porosidad (%)</p> <p>Registro fotográfico digital de porcentajes</p> <p>Registro de diferencia de espectros IR</p>	<p><b>Tipo</b> Aplicada, explicativa y Cuantitativa</p> <p><b>Métodos</b> Deductivo</p> <p><b>Diseño</b> Experimental</p> <p><b>Población</b> Todos los morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado con adición de polvo de vidrio en niveles de estudio diferente.</p> <p><b>Muestra</b> 75 morteros cúbicos obtenidos por geopolimerización mixta a base de concreto reciclado con vidrio en distintos porcentajes de dimensiones 50x50x50mm.</p>

<p>a 20%, modifica la resistencia mecánica. <b>11</b> incrementa la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.</p> <p>El incremento del porcentaje de <b>36</b>vo de vidrio en el rango de 5% a 20%, modifica las propiedades físicas; incrementa la densidad, disminuye el porcentaje de fases amorfas, como también reduce la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Determinar las propiedades mecánicas en esfuerzos de compresión de los morteros geopolimerizados mixtos mediante ensayos estándar ASTM C 10 9.</li> </ul>	<p><b>31</b></p> <p><b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b> Observación directa y Formatos de instrumentos de medición.</p> <p><b>Métodos de análisis de investigación</b> ANOVA unidireccional</p>
--	--	--

**1** Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Instrumentos	Escala de medición
<b>Variable independiente</b> Porcentaje de polvo de vidrio	Es un polvo extremadamente fino hecho de vidrio molido. Se puede utilizar en una serie de aplicaciones industriales y artesanales y, a menudo, está disponible a través de proveedores de vidrio y suministros industriales. Sus costos varían según el nivel de molienda y las aplicaciones (McMahon, 2023).	Medida de pesos durante el proceso de conformado	%w/v = (mpv/ma) * 100  %w/v: porcentaje en peso de polvo de vidrio (%) mpv: masa de polvo de vidrio (g) ma: masa de aglomerante (g)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	%
<b>Variable dependiente</b> Esfuerzo de compresión	Es la tensión de compresión máxima que un material puede soportar antes de fallar o fracturarse. Es una medida de cuánta carga puede soportar un material en compresión antes de romperse. Los materiales tienen una resistencia a la compresión mucho más alta en comparación con su resistencia a la tracción (Testbook, 2016).	Registro de carga aplicada versus área de muestra en función del tiempo	$\sigma = F/A$  $\sigma$ : Esfuerzo (MPa) F: Fuerza (N) A: Área (mm <sup>2</sup> )	Formulario	Nominal	Fichas de observación	MPa
<b>Variable dependiente</b> Densidad	La densidad de una cantidad de materia es su masa dividida por su volumen. Es una propiedad física importante para determinar la flotabilidad de los materiales en los fluidos, así como para comparar materiales y otras medidas (Kurtus, 2022).	Registro de unidad de masa sobre unidad de volumen de muestra	$\rho = m/v$  $\rho$ : Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) m: Masa (g) v: Volumen (cm <sup>3</sup> )	Formulario	Nominal	Fichas de observación	g/cm <sup>3</sup>

<p><b>13</b> Es el espacio vacío en un material. La baja porosidad evita/minimiza la entrada de sustancias corrosivas en sus componentes y, a menudo, se asocia con propiedades mecánicas y magnéticas mejoradas (Horizon Technology, 2019).</p>	<p><math>P = \frac{(pa - pr)/pa * 10}{0}</math></p> <p>P: Porosidad (%) pa: Densidad aparente sin compactación (g/cm<sup>3</sup>) pr: Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)</p>	<p>Registro del cociente del volumen de vacíos sobre volumen total de muestra</p>	<p>Formulario</p> <p>Nominal</p> <p>Fichas de observación</p> <p>%</p>
<p>Son conjuntos desordenados de átomos o partículas más grandes que, sin embargo, tienen una estructura rígida. Son fases no cristalinas en el que los átomos y las moléculas no están organizados en un patrón reticular definido. (Delgado, 2018).</p>	<p>Registro fotográfico digital de porcentajes</p>	<p>Registro de porcentaje de fases de muestra</p>	<p>Formulario</p> <p>Nominal</p> <p>Fichas de observación</p> <p>%</p>
<p>Se refiere al gel "Sodio-Aluminio-Silicato-Hidratado". Es un componente clave en la formación de geopolímeros, que son materiales formados a través de la reacción química de materiales de origen ricos en silicio (Si) y aluminio (Al) con un activador alcalino (Carrasco y Puertas, 2017).</p>	<p>Registro de transmitancia sobre número de onda de muestra</p>	<p>Registro de diferencia de espectros IR</p>	<p>Formulario</p> <p>Nominal</p> <p>Fichas de observación</p> <p>Espectro FTIR</p>

### Anexo 3: Resultados prueba de hipótesis

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo*

#### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	9.46	1.892	0.00412
0.05	5	10.92	2.184	0.00613
0.1	5	11.43	2.286	0.00518
0.15	5	12.42	2.484	0.00353
0.2	5	12.94	2.588	0.00212

#### ANÁLISIS

DE

VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.480224	4	0.370056	87.7741935	2.16274E-12	2.8660814
Dentro de los grupos	0.08432	20	0.004216			
Total	1.564544	24				



9

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo*

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	5	9.69	1.938	0.26697
0.05	5	11.01	2.202	0.00442
0.1	5	11.69	2.338	0.00487
0.15	5	12.56	2.512	0.00422
0.2	5	13.13	2.626	0.02073

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.453104	4	0.363276	6.03027788	0.002368863	2.8660814
Dentro de los grupos	1.20484	20	0.060242			
Total	2.657944	24				

9

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo*

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	5	9.91	1.982	0.00552
0.05	5	11.08	2.216	0.00863
0.1	5	11.84	2.368	0.01162
0.15	5	12.78	2.556	0.00478
0.2	5	13.3	2.66	0.00235

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1.460176	4	0.365044	55.4778116	1.51775E-10	2.8660814
Dentro de los grupos	0.1316	20	0.00658			
Total	1.591776	24				

9

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo*

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	5	63.67	12.734	0.39388
0.05	5	42.42	8.484	0.22123
0.1	5	32.62	6.524	0.23028
0.15	5	20.16	4.032	0.23167
0.2	5	17.29	3.458	0.15737

## ANÁLISIS

DE

## VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	283.258056	4	70.814514	286.830821	2.3603E-17	2.8660814
Dentro de los grupos	4.93772	20	0.246886			
Total	288.195776	24				

9

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo*

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	5	56.64	11.328	0.23282
0.05	5	36.5	7.3	0.23525
0.1	5	26.9	5.38	0.475
0.15	5	18.38	3.676	0.17508
0.2	5	15.74	3.148	0.05257

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	219.292096	4	54.823024	234.14234	1.72264E-16	2.8660814
Dentro de los grupos	4.68288	20	0.234144			
Total	223.974976	24				

9

*Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo*

## RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0	5	47.81	9.562	0.09567
0.05	5	34.62	6.924	0.04593
0.1	5	20.01	4.002	0.14707
0.15	5	16.41	3.282	0.16062
0.2	5	13.38	2.676	0.05038

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	167.2197	4	41.804926	418.32535	5.74992E-19	2.8660814
Dentro de los grupos	1.99868	20	0.099934			
Total	169.21838	24				

2  
 Prueba de hipótesis de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 7 días de ensayo

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	26.03	5.206	0.18188
0.05	5	28.87	5.774	0.09433
0.1	5	45.56	9.112	0.07117
0.15	5	66.25	13.25	0.16865
0.2	5	82.69	16.538	0.08292

ANÁLISIS  
 DE  
 VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	474.6756	4	118.6689	990.641122	1.11706E-22	2.8660814
Dentro de los grupos	2.3958	20	0.11979			
Total	477.0714	24				

Prueba de hipótesis de la <sup>2</sup> influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 14 días de ensayo

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	31.63	6.326	0.22483
0.05	5	39.55	7.91	0.08375
0.1	5	58.28	11.656	0.34598
0.15	5	78.87	15.774	0.33773
0.2	5	103.88	20.776	0.39513

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	695.54646	4	173.88661	626.65456	1.05478E-20	2.8660814
Dentro de los grupos	5.54968	20	0.277484			
Total	701.09614	24				

Prueba de hipótesis de la <sup>2</sup> influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado a 28 días de ensayo

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	5	45.76	9.152	0.07457
0.05	5	56.85	11.37	0.48075
0.1	5	84.1	16.82	0.16845
0.15	5	105.58	21.116	0.60153
0.2	5	127.79	25.558	0.18152

ANÁLISIS  
DE  
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	916.537864	4	229.134466	760.324611	1.54899E-21	2.8660814
Dentro de los grupos	6.02728	20	0.301364			
Total	922.565144	24				



Anexo 4: Resultados de laboratorio

*Resultados de la influencia de polvo de vidrio sobre la densidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado*

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	1.84	1.95	1.87	1.83	1.97	1.89
MV2 - 1 / a2	2.12	2.24	2.11	2.29	2.16	2.18
MV3 - 1 / a3	2.34	2.27	2.22	2.38	2.22	2.29
MV4 - 1 / a4	2.53	2.44	2.56	2.47	2.42	2.48
MV5 - 1 / a5	2.64	2.55	2.61	2.53	2.61	2.59
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	2.66	1.95	1.91	1.2	1.97	1.94
MV2 - 2 / a2	2.12	2.24	2.2	2.29	2.16	2.20
MV3 - 2 / a3	2.34	2.27	2.27	2.38	2.43	2.34
MV4 - 2 / a4	2.53	2.44	2.51	2.47	2.61	2.51
MV5 - 2 / a5	2.64	2.86	2.61	2.53	2.49	2.63
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	1.92	2.04	2	1.89	2.06	1.98
MV2 - 3 / a2	2.28	2.19	2.34	2.11	2.16	2.22
MV3 - 3 / a3	2.31	2.51	2.45	2.32	2.25	2.37
MV4 - 3 / a4	2.63	2.53	2.49	2.63	2.5	2.56
MV5 - 3 / a5	2.72	2.67	2.59	2.64	2.68	2.66

*Resultados de la influencia de polvo de vidrio sobre la porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado*

Porosidad (%)						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	13.4	13.0	13.1	12.2	11.9	12.7
MV2 - 1 / a2	8.7	8.2	7.8	9.0	8.8	8.5
MV3 - 1 / a3	7.2	6.9	6.0	6.4	6.2	6.5
MV4 - 1 / a4	3.4	3.8	4.1	4.6	4.3	4.0
MV5 - 1 / a5	3.1	3.9	3.6	3.0	3.8	3.5
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	12.0	11.2	11.3	10.7	11.5	11.3
MV2 - 2 / a2	7.2	7.0	8.2	7.0	7.1	7.3
MV3 - 2 / a3	5.8	6.0	4.3	5.2	5.7	5.4
MV4 - 2 / a4	4.2	3.5	3.9	3.1	3.7	3.7
MV5 - 2 / a5	3.4	3.2	2.9	3.0	3.3	3.1
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	9.9	9.7	9.6	9.1	9.5	9.6
MV2 - 3 / a2	7.0	7.0	6.6	6.8	7.1	6.9
MV3 - 3 / a3	3.5	4.3	4.1	3.7	4.4	4.0
MV4 - 3 / a4	3.9	3.0	3.5	3.2	2.9	3.3
MV5 - 3 / a5	2.8	2.9	2.8	2.6	2.3	2.7

*Resultados de la influencia de polvo de vidrio sobre la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado*

4 Resistencia a la compresión (MPa)						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	4.54	5.05	5.46	5.36	5.62	5.21
MV2 - 1 / a2	5.47	5.98	6.11	5.43	5.88	5.77
MV3 - 1 / a3	9.49	8.78	9.03	9.24	9.02	9.11
MV4 - 1 / a4	12.81	13.17	13.89	13.02	13.36	13.25
MV5 - 1 / a5	16.13	16.85	16.39	16.75	16.57	16.54
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	5.76	6.61	6.89	6.45	5.92	6.33
MV2 - 2 / a2	8.27	7.58	8.14	7.71	7.85	7.91
MV3 - 2 / a3	12.32	11.69	10.89	12.11	11.27	11.66
MV4 - 2 / a4	15.22	16.05	15.63	16.64	15.33	15.77
MV5 - 2 / a5	21.38	20.21	20.92	21.34	20.03	20.78
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	9.42	9.03	9.04	9.45	8.82	9.15
MV2 - 3 / a2	12.12	11.65	10.81	11.79	10.48	11.37
MV3 - 3 / a3	16.34	16.56	17.28	17.21	16.71	16.82
MV4 - 3 / a4	21.97	20.68	21.83	20.96	20.14	21.12
MV5 - 3 / a5	26.04	25.02	25.52	25.29	25.92	25.56

Anexo 5: Fotografías de evidencias de la investigación

Morteros con 0% de adición <sup>3</sup> de polvo de vidrio



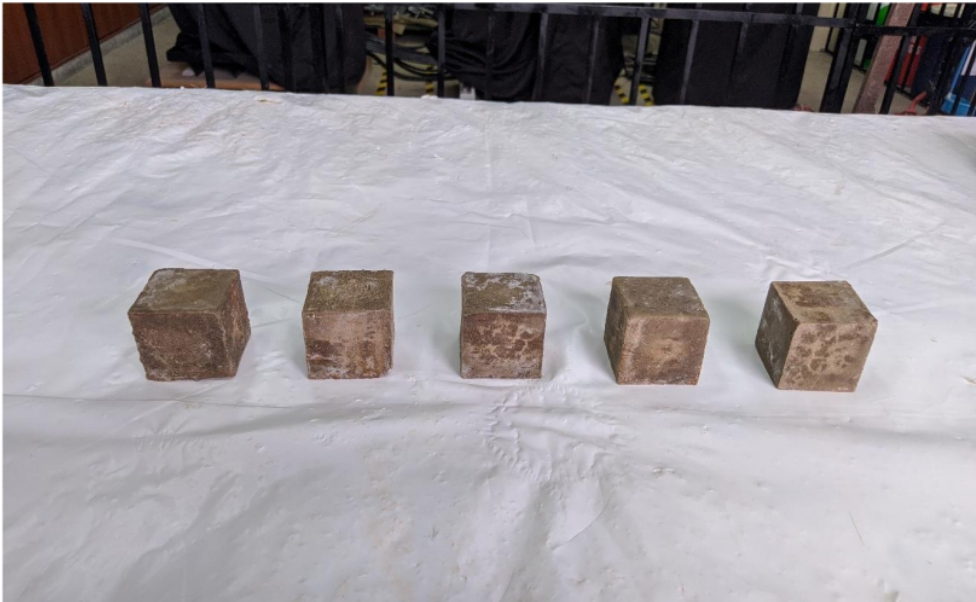
Morteros con 5% de adición de polvo de vidrio



Morteros con 10 % de adición <sup>3</sup> de polvo de vidrio



Morteros con 15% de adición de polvo de vidrio



*Morteros con 20% de adición de polvo de vidrio*



*Medición de los morteros con pie de rey (Vernier)*



*Prueba de compresión de mortero*



*Secado del mortero en horno*



*Adición de polvo de vidrio a mezcla de concreto reciclado y arena gruesa*



*Adición de activador alcalino con solución de NaOH 8M*





*Amasado de morteros geopoliméricos*



*Acondicionamiento de las mezclas de mortero en su respectivo molde*



*Vista superior de mortero geopolimérico*



*Vista inferior de mortero geopolimérico*



*Vista isométrica de mortero geopolimérico*



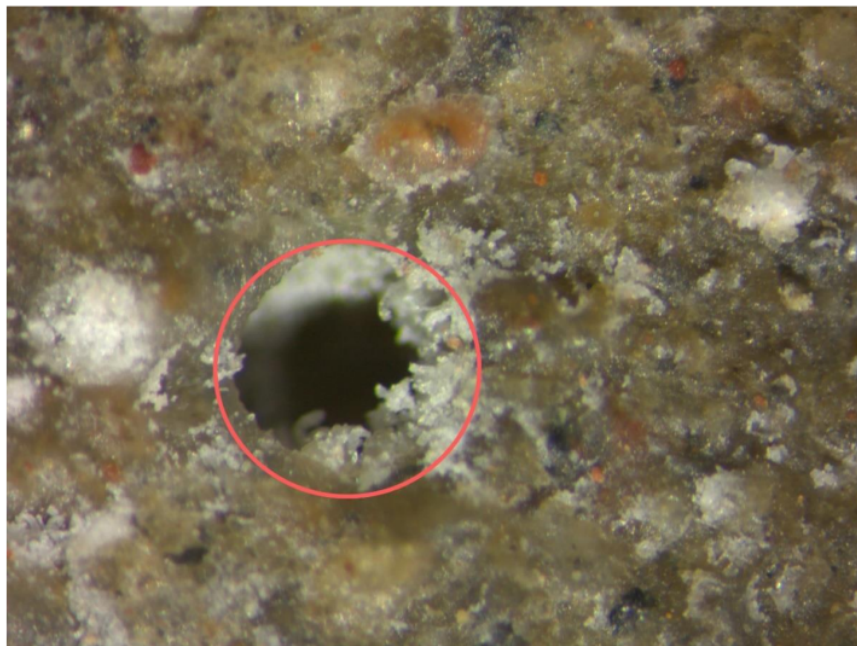
*Mortero geopolimérico sometido a esfuerzo de compresión*



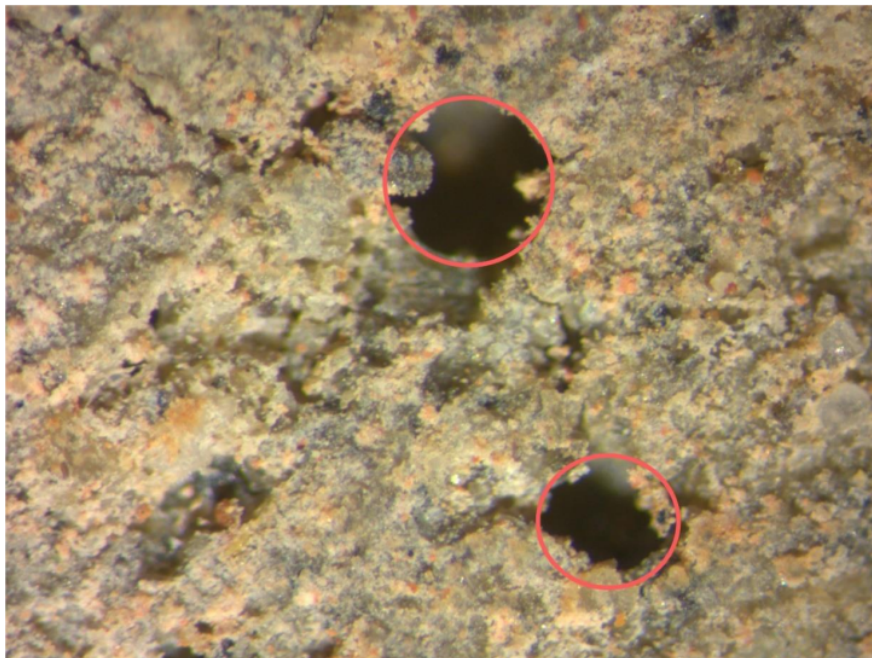
*Falla de mortero geopolimérico sometido a esfuerzo de compresión*



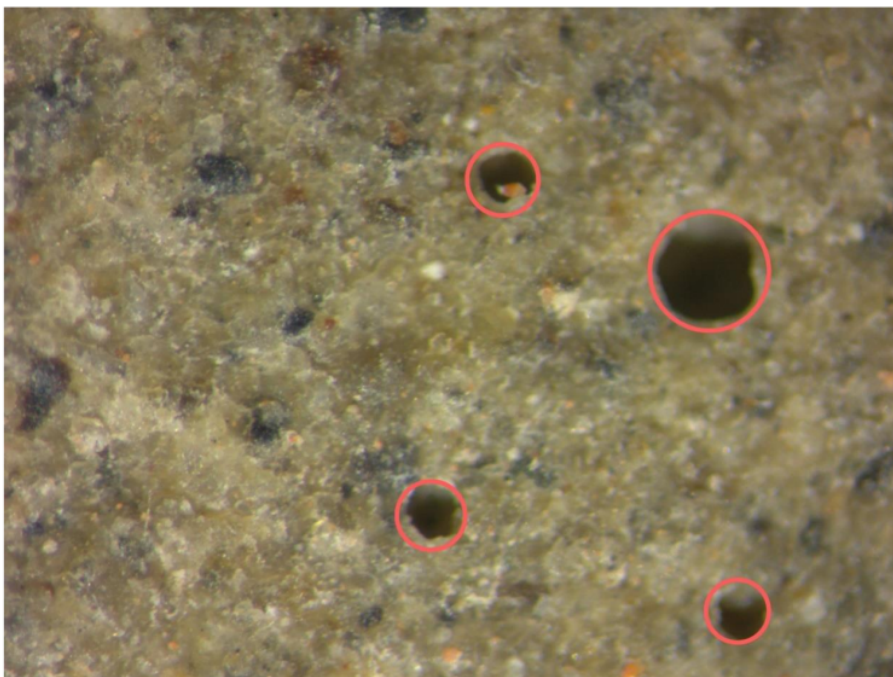
*Porosidad de mortero geopolimérico con 0% de adición de polvo de vidrio*



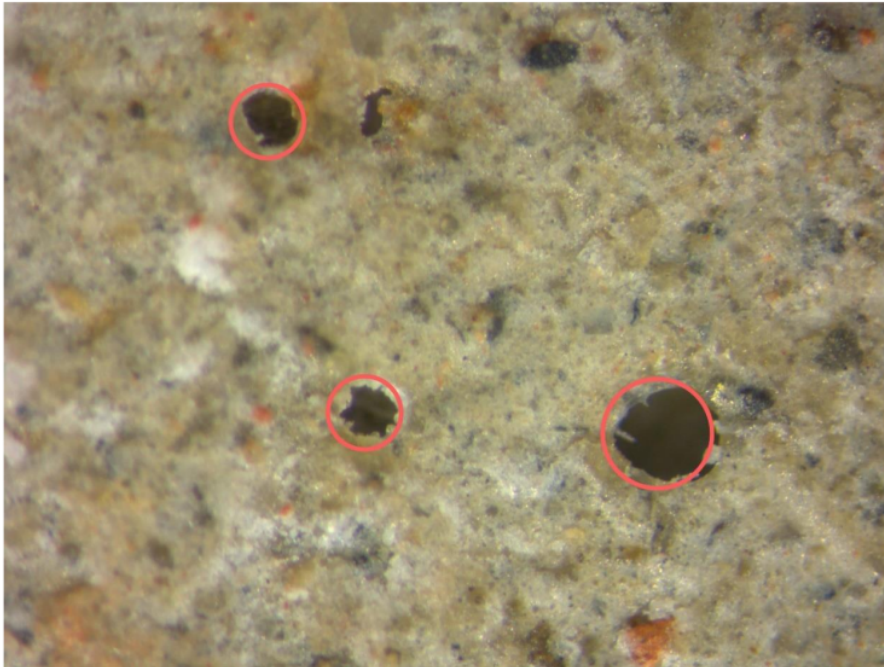
*Porosidad de mortero geopolimérico con 5% de adición de polvo de vidrio*



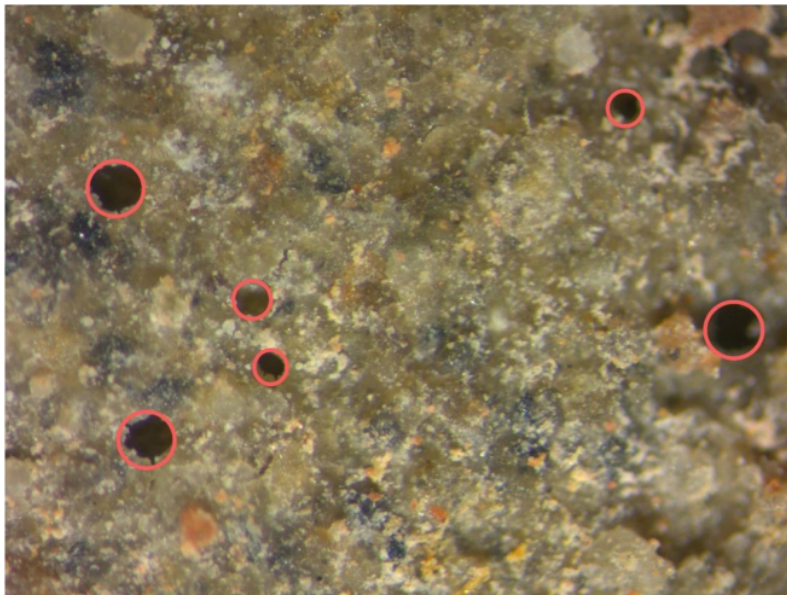
*Porosidad de mortero geopolimérico con 10 % de adición de polvo de vidrio*



*Porosidad de mortero geopolimérico con 15% de adición de polvo de vidrio*



*Porosidad de mortero geopolimérico con 20% de adición de polvo de vidrio*



Reporte de análisis de físico químico mecánicos de muestras



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

REPORTE DE ANALISIS DE FISICO QUIMICO MECANICOS DE MUESTRAS

SOLICITANTE: Br. José Amado Vivas Reymundo

Fecha: 20 octubre 2023. Nota: Muestras puestas en laboratorio

Tabla 1.0. Resultados de la densidad de morteros geopolimerizadas mixtos a base de concreto reciclado

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	1.84	1.95	1.87	1.83	1.97	1.89
MV2 - 1 / a2	2.12	2.24	2.11	2.29	2.16	2.18
MV3 - 1 / a3	2.34	2.27	2.22	2.38	2.22	2.29
MV4 - 1 / a4	2.53	2.44	2.56	2.47	2.42	2.48
MV5 - 1 / a5	2.64	2.55	2.61	2.53	2.61	2.59
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	2.66	1.95	1.91	1.2	1.97	1.94
MV2 - 2 / a2	2.12	2.24	2.2	2.29	2.16	2.20
MV3 - 2 / a3	2.34	2.27	2.27	2.38	2.43	2.34
MV4 - 2 / a4	2.53	2.44	2.51	2.47	2.61	2.51
MV5 - 2 / a5	2.64	2.86	2.61	2.53	2.49	2.63
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	1.92	2.04	2	1.89	2.06	1.98
MV2 - 3 / a2	2.28	2.19	2.34	2.11	2.16	2.22
MV3 - 3 / a3	2.31	2.51	2.45	2.32	2.25	2.37
MV4 - 3 / a4	2.63	2.53	2.49	2.63	2.5	2.56
MV5 - 3 / a5	2.72	2.67	2.59	2.64	2.68	2.66



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

## Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 2.0 Resultados de porosidad de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

Porosidad (%)						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	13.4	13.0	13.1	12.2	11.9	12.7
MV2 - 1 / a2	8.7	8.2	7.8	9.0	8.8	8.5
MV3 - 1 / a3	7.2	6.9	6.0	6.4	6.2	6.5
MV4 - 1 / a4	3.4	3.8	4.1	4.6	4.3	4.0
MV5 - 1 / a5	3.1	3.9	3.6	3.0	3.8	3.5
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	12.0	11.2	11.3	10.7	11.5	11.3
MV2 - 2 / a2	7.2	7.0	8.2	7.0	7.1	7.3
MV3 - 2 / a3	5.8	6.0	4.3	5.2	5.7	5.4
MV4 - 2 / a4	4.2	3.5	3.9	3.1	3.7	3.7
MV5 - 2 / a5	3.4	3.2	2.9	3.0	3.3	3.1
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	9.9	9.7	9.6	9.1	9.5	9.6
MV2 - 3 / a2	7.0	7.0	6.6	6.8	7.1	6.9
MV3 - 3 / a3	3.5	4.3	4.1	3.7	4.4	4.0
MV4 - 3 / a4	3.9	3.0	3.5	3.2	2.9	3.3
MV5 - 3 / a5	2.8	2.9	2.8	2.6	2.3	2.7





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

## Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

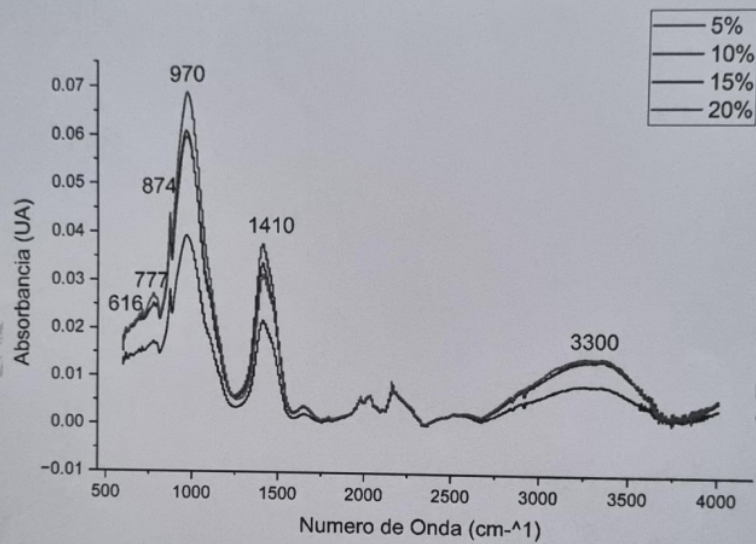
Tabla 3.0 Resultados de la resistencia a la compresión de morteros geopolimerizados mixtos a base de concreto reciclado

Resistencia a la compresión (MPa)						
7 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 1 / a1	4.54	5.05	5.46	5.36	5.62	5.21
MV2 - 1 / a2	5.47	5.98	6.11	5.43	5.88	5.77
MV3 - 1 / a3	9.49	8.78	9.03	9.24	9.02	9.11
MV4 - 1 / a4	12.81	13.17	13.89	13.02	13.36	13.25
MV5 - 1 / a5	16.13	16.85	16.39	16.75	16.57	16.54
14 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 2 / a1	5.76	6.61	6.89	6.45	5.92	6.33
MV2 - 2 / a2	8.27	7.58	8.14	7.71	7.85	7.91
MV3 - 2 / a3	12.32	11.69	10.89	12.11	11.27	11.66
MV4 - 2 / a4	15.22	16.05	15.63	16.64	15.33	15.77
MV5 - 2 / a5	21.38	20.21	20.92	21.34	20.03	20.78
28 días de Ensayo						
Mortero	Rep1	Rep2	Rep3	Rep4	Rep5	Prom
MV1 - 3 / a1	9.42	9.03	9.04	9.45	8.82	9.15
MV2 - 3 / a2	12.12	11.65	10.81	11.79	10.48	11.37
MV3 - 3 / a3	16.34	16.56	17.28	17.21	16.71	16.82
MV4 - 3 / a4	21.97	20.68	21.83	20.96	20.14	21.12
MV5 - 3 / a5	26.04	25.02	25.52	25.29	25.92	25.56



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Gráfico 1.0. Espectro FTIR de morteros geopolimerizados obtenidos



Dr. Ing. Vega Anticona Alexander Y.  
Jefe de Laboratorio

## Anexo 6: Normativas empleadas

### Norma ASTM C188



Designation: C 188 – 95 (Reapproved 2003)

American Association State  
Highway and Transportation Officials Standard  
AASHTO No.: T133

## Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 188; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

### 1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the density of hydraulic cement. Its particular usefulness is in connection with the design and control of concrete mixtures.

1.2 The density of hydraulic cement is defined as the mass of a unit volume of the solids.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

### 2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement<sup>2</sup>

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials<sup>3</sup>

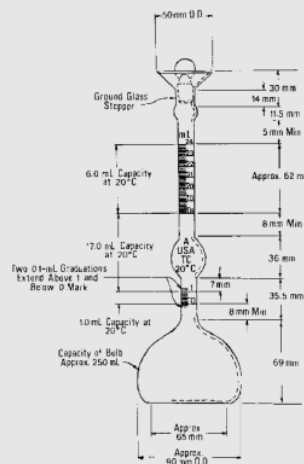
### 3. Apparatus

3.1 *Le Chatelier flask*—The standard flask, which is circular in cross section, with shape and dimensions conforming essentially to Fig. 1 (Note 1). The requirements in regard to tolerance, inscription and length, spacing, and uniformity of graduation will be rigidly observed. There shall be a space of at least 10 mm between the highest graduation mark and the lowest point of grinding for the glass stopper.

3.1.1 The material of construction shall be excellent quality glass, transparent and free of striae. The glass shall be chemically resistant and shall have small thermal hysteresis. The flasks shall be thoroughly annealed before being graduated. They shall be of sufficient thickness to ensure reasonable resistance to breakage.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement, and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.  
Current edition approved June 10, 2003. Published August 2003. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 1995 as C 188 – 95.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.  
<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.



NOTE—Variations of a few millimetres in such dimensions as total height of flask, diameter of base, and so forth, are to be expected and will not be considered sufficient cause for rejection. The dimensions of the flask shown in Fig. 1 apply only to new flasks and not to flasks in use which meet the other requirements of this test method.

FIG. 1 Le Chatelier Flask for Density Test

3.1.2 The neck shall be graduated from 0 to 1 mL and from 18 to 24 mL in 0.1-mL graduations. The error of any indicated capacity shall not be greater than 0.05 mL.

3.1.3 Each flask shall bear a permanent identification number and the stopper, if not interchangeably ground, shall bear the same number. Interchangeable ground-glass parts shall be marked on both members with the standard-taper symbol, followed by the size designation. The standard temperature shall be indicated, and the unit of capacity shall be shown by the letters "mL" placed above the highest graduation mark.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2956, United States.

Copyright ASTM International  
Provided by IHS under license with ASTM  
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Licensee: Purdue University/5923082001  
Not for Resale, 12/10/2007 14:13:56 MST

3.2 Kerosine, free of water, or naphtha, having a density greater than 0.73 g/mL at  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  shall be used in the density determination.

3.3 The use of alternative equipment or methods for determining density is permitted provided that a single operator can obtain results within  $\pm 0.03\text{ Mg/m}^3$  of the results obtained using the flask method.

**NOTE 1**—The design is intended to ensure complete drainage of the flask when emptied, and stability of standing on a level surface, as well as accuracy and precision of reading.

#### 4. Procedure

4.1 Determine the density of cement on the material as received, unless otherwise specified. If the density determination on a loss-free sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in section 16.1 on Portland Cement of Test Methods C 114.

4.2 Fill the flask (Note 2) with either of the liquids specified in 3.2 to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Dry the inside of the flask above the level of the liquid, if necessary, after pouring. Record the first reading after the flask has been immersed in the water bath (Note 3) in accordance with 4.4.

**NOTE 2**—It is advisable to use a rubber pad on the table top when filling or rolling the flask.

**NOTE 3**—Before the cement has been added to the flask, a loose-fitting, lead-ring weight around the stem of the flask will be helpful in holding the flask in an upright position in the water bath, or the flask may be held in the water bath by a buret clamp.

4.3 Introduce a quantity of cement, weighed to the nearest 0.05 g, (about 64 g for portland cement) in small increments at the same temperature as the liquid (Note 2). Take care to avoid splashing and see that the cement does not adhere to the inside of the flask above the liquid. A vibrating apparatus may be used to accelerate the introduction of the cement into the flask and to prevent the cement from sticking to the neck. After all the cement has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position (Note 2), or gently whirl it in a horizontal circle, so as to free the cement from air until no further air bubbles rise to the surface of the liquid. If a proper amount of cement has been added, the level of the liquid will be in its final position at some point of the upper series of

graduations. Take the final reading after the flask has been immersed in the water bath in accordance with 4.4.

4.4 Immerse the flask in a constant-temperature water bath for sufficient periods of time in order to avoid flask temperature variations greater than  $0.2^\circ\text{C}$  between the initial and the final readings.

#### 5. Calculation

5.1 The difference between the first and the final readings represents the volume of liquid displaced by the mass of cement used in the test.

5.2 Calculate the cement density,  $\rho$ , as follows:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \text{mass of cement, g} / \text{displaced volume, cm}^3$$

**NOTE 4**—The displaced volume in millilitres is numerically equal to the displaced volume in cubic centimetres.

**NOTE 5**—Density in megagrams per cubic metre ( $\text{Mg/m}^3$ ) is numerically equal to grams per cubic centimetre ( $\text{g/cm}^3$ ). Calculate the cement density,  $\rho$ , to three decimal places and round to the nearest  $0.01\text{ Mg/m}^3$ .

**NOTE 6**—In connection with proportioning and control of concrete mixtures, density may be more usefully expressed as specific gravity, the latter being a dimensionless number. Calculate the specific gravity as follows: Sp gr = cement density/water density at  $4^\circ\text{C}$  (at  $4^\circ\text{C}$  the density of water is  $1\text{ Mg/m}^3(1\text{ g/cm}^3)$ ).

#### 6. Precision and Bias

6.1 The single-operator standard deviation for portland cements has been found to be 0.012.<sup>4</sup> Therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 0.03.

6.2 The multilaboratory standard deviation for portland cements has been found to be 0.037.<sup>4</sup> Therefore, the results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same cement should not differ by more than 0.10.<sup>4</sup>

6.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

#### 7. Keywords

7.1 density; hydraulic cement; specific gravity

<sup>4</sup> These numbers represent the 1s and d2s limits described in Practice C 670.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



Designation: C 109/C 109M – 99

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS  
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428  
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

## Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 109/C 109M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 This test method covers determination of the compressive strength of hydraulic cement mortars, using 2-in. or [50-mm] cube specimens.

NOTE 1—Test Method C 349 provides an alternative procedure for this determination (not to be used for acceptance tests).

1.2 This test method covers the application of the test using either inch-pound or SI units. The values stated in either system shall be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

1.3 Values in SI units shall be obtained by measurement in SI units or by appropriate conversion, using the Rules for Conversion and Rounding given in Standard IEEE/ASTM SI 10, of measurements made in other units.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- C 230 Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement<sup>2</sup>
- C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency<sup>2</sup>
- C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)<sup>2</sup>
- C 511 Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes<sup>2</sup>
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-1 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.

Current edition approved Jan. 10, 1999. Published May 1999. Originally published as C 109 – 34 T. Last previous edition C 109 – 98.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

for Test Methods for Construction Materials<sup>3</sup>  
C 778 Specification for Standard Sand<sup>2</sup>

C 1005 Specification for Weights and Weighing Devices for Use in Physical Testing of Hydraulic Cements<sup>2</sup>  
IEEE/ASTM SI 10 Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System<sup>4</sup>

### 3. Summary of Test Method

3.1 The mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass. Portland or air-entraining portland cements are mixed at specified water/cement ratios. Water content for other cements is that sufficient to obtain a flow of  $110 \pm 5$  in 25 drops of the flow table. Two-inch or [50-mm] test cubes are compacted by tamping in two layers. The cubes are cured one day in the molds and stripped and immersed in lime water until tested.

### 4. Significance and Use

4.1 This test method provides a means of determining the compressive strength of hydraulic cement and other mortars and results may be used to determine compliance with specifications. Further, this test method is referenced by numerous other specifications and test methods. Caution must be exercised in using the results of this test method to predict the strength of concretes.

### 5. Apparatus

5.1 *Weights and Weighing Devices*, shall conform to the requirements of Specification C 1005. The weighing device shall be evaluated for precision and bias at a total load of 2000 g.

5.2 *Glass Graduates*, of suitable capacities (preferably large enough to measure the mixing water in a single operation) to deliver the indicated volume at 20°C. The permissible variation shall be  $\pm 2$  mL. These graduates shall be subdivided to at least 5 mL, except that the graduation lines may be omitted for the lowest 10 mL for a 250-mL graduate and for the lowest 25 mL of a 500-mL graduate. The main graduation lines shall be circles and shall be numbered. The least graduations shall extend at least one seventh of the way around, and intermediate

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

DIGITADO

C 109/C 109M

graduations shall extend at least one fifth of the way around.

5.3 *Specimen Molds*, for the 2-in. or [50-mm] cube specimens shall be tight fitting. The molds shall have not more than three cube compartments and shall be separable into not more than two parts. The parts of the molds when assembled shall be positively held together. The molds shall be made of hard metal not attacked by the cement mortar. For new molds the Rockwell hardness number of the metal shall be not less than 55 HRB. The sides of the molds shall be sufficiently rigid to prevent spreading or warping. The interior faces of the molds shall be plane surfaces and shall conform to the tolerances of Table 1.

5.4 *Mixer, Bowl and Paddle*, an electrically driven mechanical mixer of the type equipped with paddle and mixing bowl, as specified in Practice C 305.

5.5 *Flow Table and Flow Mold*, conforming to the requirements of Specification C 230.

5.6 *Tamper*, a nonabsorptive, nonabrasive, nonbrittle material such as a rubber compound having a Shore A durometer hardness of  $80 \pm 10$  or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392°F or [200°C], shall have a cross section of about 1/2 by 1 in. or [13 by 25 mm] and a convenient length of about 5 to 6 in. or [120 to 150 mm]. The tamping face shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

5.7 *Trowel*, having a steel blade 4 to 6 in. [100 to 150 mm] in length, with straight edges.

5.8 *Moist Cabinet or Room*, conforming to the requirements of Specification C 511.

5.9 *Testing Machine*, either the hydraulic or the screw type, with sufficient opening between the upper bearing surface and the lower bearing surface of the machine to permit the use of verifying apparatus. The load applied to the test specimen shall be indicated with an accuracy of  $\pm 1.0\%$ . If the load applied by the compression machine is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that can be read to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 2). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment that is easily accessible from the outside of the dial case, and with a suitable device that at all times until reset,

will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

5.9.1 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 2—As close as can be read is considered 1/16 in. or [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of the scale interval is about as close as can reasonably be read when the spacing on the load indicating mechanism is between 1/25 in. or [1 mm] and 1/16 in. or [1.6 mm]. When the spacing is between 1/16 in. or [1.6 mm] and 1/8 in. or [3.2 mm], one third of the scale interval can be read with reasonable certainty. When the spacing is 1/8 in. or [3.2 mm] or more, one fourth of the scale interval can be read with reasonable certainty.

5.9.2 The upper bearing shall be a spherically seated, hardened metal block firmly attached at the center of the upper head of the machine. The center of the sphere shall lie at the center of the surface of the block in contact with the specimen. The block shall be closely held in its spherical seat, but shall be free to tilt in any direction. The diagonal or diameter (Note 3) of the bearing surface shall be only slightly greater than the diagonal of the face of the 2-in. or [50-mm] cube in order to facilitate accurate centering of the specimen. A hardened metal bearing block shall be used beneath the specimen to minimize wear of the lower platen of the machine. The bearing block surfaces intended for contact with the specimen shall have a Rockwell hardness number not less than 60 HRC. These surfaces shall not depart from plane surfaces by more than 0.0005 in. or [0.013 mm] when the blocks are new and shall be maintained within a permissible variation of 0.001 in. or [0.025 mm].

NOTE 3—A diameter of 3/4 in. or [79.4 mm], is satisfactory, provided that the lower bearing block has a diameter slightly greater than the diagonal of the face of the 2-in. or [50-mm] cube but not more than 2.9 in. or [74 mm], and is centered with respect to the upper bearing block and held in position by suitable means.

## 6. Materials

### 6.1 Graded Standard Sand:

6.1.1 The sand (Note 4) used for making test specimens

TABLE 1 Permissible Variations of Specimen Molds

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	<0.025 mm	<0.05 mm
Distance between opposite sides	2 in. $\pm$ 0.005	2 in. $\pm$ 0.02	[50 mm $\pm$ 0.13 mm]	[50 mm $\pm$ 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to - 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to - 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm] to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm] to - 0.38 mm]
Angle between adjacent faces <sup>A</sup>	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°

<sup>A</sup> Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

**C 109/C 109M**

shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification C 778.

*NOTE 4—Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

**7. Temperature and Humidity**

7.1 *Temperature*—The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry materials, molds, base plates, and mixing bowl, shall be maintained between 68 and 81.5°F or [20 and 27.5°C]. The temperature of the mixing water, moist closet or moist room, and water in the storage tank shall be set at 73.5 ± 3.5°F or [23 ± 2°C] and shall not vary from this temperature by more than ± 3°F or [± 1.7°C].

7.2 *Humidity*—The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50%. The moist closet or moist room shall conform to the requirements of Specification C 511.

**8. Test Specimens**

8.1 Make two or three specimens from a batch of mortar for each period of test or test age.

**9. Preparation of Specimen Molds**

9.1 Apply a thin coating of release agent to the interior faces of the mold and non-absorptive base plates. Apply oils and greases using an impregnated cloth or other suitable means. Wipe the mold faces and the base plate with a cloth as necessary to remove any excess release agent and to achieve a thin, even coating on the interior surfaces. When using an aerosol lubricant, spray the release agent directly onto the mold faces and base plate from a distance of 6 to 8 in. or [150 to 200 mm] to achieve complete coverage. After spraying, wipe the surface with a cloth as necessary to remove any excess aerosol lubricant. The residue coating should be just sufficient to allow a distinct finger print to remain following light finger pressure (Note 5).

9.2 Seal the surfaces where the halves of the mold join by applying a coating of light cup grease such as petrolatum. The amount should be sufficient to extrude slightly when the two halves are tightened together. Remove any excess grease with a cloth.

9.3 After placing the mold on its base plate (and attaching, if clamp-type) carefully remove with a dry cloth any excess oil or grease from the surface of the mold and the base plate to which watertight sealant is to be applied. As a sealant, use paraffin, microcrystalline wax, or a mixture of three parts paraffin to five parts rosin by mass. Liquify the sealant by heating between 230 and 248°F or [110 and 120°C]. Effect a watertight seal by applying the liquefied sealant at the outside contact lines between the mold and its base plate.

*NOTE 5*—Because aerosol lubricants evaporate, molds should be checked for a sufficient coating of lubricant immediately prior to use. If an extended period of time has elapsed since treatment, retreatment may be necessary.

*NOTE 6—Watertight Molds* The mixture of paraffin and rosin specified

for sealing the joints between molds and base plates may be found difficult to remove when molds are being cleaned. Use of straight paraffin is permissible if a watertight joint is secured, but due to the low strength of paraffin it should be used only when the mold is not held to the base plate by the paraffin alone. A watertight joint may be secured with paraffin alone by slightly warming the mold and base plate before brushing the joint. Molds so treated should be allowed to return to the specified temperature before use.

**10. Procedure**

10.1 *Composition of Mortars:*

10.1.1 The proportions of materials for the standard mortar shall be one part of cement to 2.75 parts of graded standard sand by weight. Use a water-cement ratio of 0.485 for all portland cements and 0.460 for all air-entraining portland cements. The amount of mixing water for other than portland and air-entraining portland cements shall be such as to produce a flow of 110 ± 5 as determined in accordance with 10.3 and shall be expressed as weight percent of cement.

10.1.2 The quantities of materials to be mixed at one time in the batch of mortar for making six and nine test specimens shall be as follows:

	Number of Specimens	
	6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 ± 5)	...	...

10.2 *Preparation of Mortar:*

10.2.1 Mechanically mix in accordance with the procedure given in Practice C 305.

10.3 *Determination of Flow:*

10.3.1 Carefully wipe the flow-table top clean and dry, and place the flow mold at the center. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] in thickness in the mold and tamp 20 times with the tamper. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the mold. Then fill the mold with mortar and tamp as specified for the first layer. Cut off the mortar to a plane surface, flush with the top of the mold, by drawing the straight edge of a trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion across the top of the mold. Wipe the table top clean and dry, being especially careful to remove any water from around the edge of the flow mold. Lift the mold away from the mortar 1 min after completing the mixing operation. Immediately, drop the table through a height of ½ in. or [13 mm] 25 times in 15 s. Using the calipers, determine the flow by measuring the diameters of the mortar along the lines scribed in the table top, adding the four readings. The total of the four readings from the calipers equals the percent increase of the original diameter of the mortar.

10.3.2 For portland and air-entraining portland cements, merely record the flow.

10.3.3 In the case of cements other than portland or air-entraining portland cements, make trial mortars with varying percentages of water until the specified flow is obtained. Make each trial with fresh mortar.

10.4 *Molding Test Specimens:*

10.4.1 Immediately following completion of the flow test,

C 109/C 109M

return the mortar from the flow table to the mixing bowl. Quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl and then remix the entire batch 15 s at medium speed. Upon completion of mixing, the mixing paddle shall be shaken to remove excess mortar into the mixing bowl.

10.4.2 When a duplicate batch is to be made immediately for additional specimens, the flow test may be omitted and the mortar allowed to stand in the mixing bowl 90 s without covering. During the last 15 s of this interval, quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl. Then remix for 15 s at medium speed.

10.4.3 Start molding the specimens within a total elapsed time of not more than 2 min and 30 s after completion of the original mixing of the mortar batch. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] (approximately one half of the depth of the mold) in all of the cube compartments. Tamp the mortar in each cube compartment 32 times in about 10 s in 4 rounds, each round to be at right angles to the other and consisting of eight adjoining strokes over the surface of the specimen, as illustrated in Fig. 1. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the molds. The 4 rounds of tamping (32 strokes) of the mortar shall be completed in one cube before going to the next. When the tamping of the first layer in all of the cube compartments is completed, fill the compartments with the remaining mortar and then tamp as specified for the first layer. During tamping of the second layer bring in the mortar forced out onto the tops of the molds after each round of tamping by means of the gloved fingers and the tamper upon completion of each round and before starting the next round of tamping. On completion of the tamping, the tops of all cubes should extend slightly above the tops of the molds. Bring in the mortar that has been forced out onto the tops of the molds with a trowel and smooth off the cubes by drawing the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) once across the top of each cube at right angles to the length of the mold. Then, for the purpose of leveling the mortar and making the mortar that protrudes above the top of the mold of more uniform thickness, draw the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) lightly once along the length of the mold. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straight edge of the trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion over the length of the mold.

10.5 *Storage of Test Specimens*—Immediately upon completion of molding, place the test specimens in the moist closet or moist room. Keep all test specimens, immediately

after molding, in the molds on the base plates in the moist closet or moist room from 20 to 72 h with their upper surfaces exposed to the moist air but protected from dripping water. If the specimens are removed from the molds before 24 h, keep them on the shelves of the moist closet or moist room until they are 24-h old, and then immerse the specimens, except those for the 24-h test, in saturated lime water in storage tanks constructed of noncorroding materials. Keep the storage water clean by changing as required.

10.6 *Determination of Compressive Strength:*

10.6.1 Test the specimens immediately after their removal from the moist closet in the case of 24-h specimens, and from storage water in the case of all other specimens. All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible tolerance prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	±½ h
3 days	±1 h
7 days	±3 h
28 days	±12 h

If more than one specimen at a time is removed from the moist closet for the 24-h tests, keep these specimens covered with a damp cloth until time of testing. If more than one specimen at a time is removed from the storage water for testing, keep these specimens in water at a temperature of 73.5± 3.5°F or [23 ± 2°C] and of sufficient depth to completely immerse each specimen until time of testing.

10.6.2 Wipe each specimen to a surface-dry condition, and remove any loose sand grains or incrustations from the faces that will be in contact with the bearing blocks of the testing machine. Check these faces by applying a straightedge (Note 7). If there is appreciable curvature, grind the face or faces to plane surfaces or discard the specimen. A periodic check of the cross-sectional area of the specimens should be made.

NOTE 7—*Specimen Faces*—Results much lower than the true strength will be obtained by loading faces of the cube specimen that are not truly plane surfaces. Therefore, it is essential that specimen molds be kept scrupulously clean, as otherwise, large irregularities in the surfaces will occur. Instruments for cleaning molds should always be softer than the metal in the molds to prevent wear. In case grinding specimen faces is necessary, it can be accomplished best by rubbing the specimen on a sheet of fine emery paper or cloth glued to a plane surface, using only a moderate pressure. Such grinding is tedious for more than a few thousandths of an inch (hundredths of a millimetre); where more than this is found necessary, it is recommended that the specimen be discarded.

10.6.3 Apply the load to specimen faces that were in contact with the true plane surfaces of the mold. Carefully place the specimen in the testing machine below the center of the upper bearing block. Prior to the testing of each cube, it shall be ascertained that the spherically seated block is free to tilt. Use no cushioning or bedding materials. Bring the spherically seated block into uniform contact with the surface of the specimen. Apply the load rate at a relative rate of movement between the upper and lower platens corresponding to a loading on the specimen with the range of 200 to 400 lbs/s [900 to 1800 N/S]. Obtain this designated rate of movement of the platen during the first half of the anticipated maximum load and make no adjustment in the rate of movement of the platen in the latter half of the loading especially while the cube is

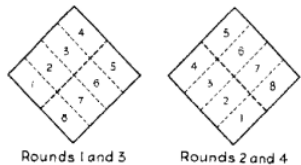


FIG. 1 Order of Tamping in Molding of Test Specimens



**C 109/C 109M**

yielding before failure.

NOTE 8—It is advisable to apply only a very light coating of a good quality, light mineral oil to the spherical seat of the upper platen.

**11. Calculation**

11.1 Record the total maximum load indicated by the testing machine, and calculate the compressive strength as follows:

$$f_m = P/A \quad (1)$$

where:

$f_m$  = compressive strength in psi or [MPa],  
 $P$  = total maximum load in lbf or [N], and  
 $A$  = area of loaded surface in<sup>2</sup> or [mm<sup>2</sup>].

Either 2-in. or [50-mm] cube specimens may be used for the determination of compressive strength, whether inch-pound or SI units are used. However, consistent units for load and area must be used to calculate strength in the units selected. If the cross-sectional area of a specimen varies more than 1.5 % from the nominal, use the actual area for the calculation of the compressive strength. The compressive strength of all acceptable test specimens (see Section 12) made from the same sample and tested at the same period shall be averaged and reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

**12. Report**

12.1 Report the flow to the nearest 1 % and the water used to the nearest 0.1 %. Average compressive strength of all specimens from the same sample shall be reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

**13. Faulty Specimens and Retests**

13.1 In determining the compressive strength, do not consider specimens that are manifestly faulty.

13.2 The maximum permissible range between specimens from the same mortar batch, at the same test age is 8.7 % of the average when three cubes represent a test age and 7.6 % when two cubes represent a test age (Note 9).

NOTE 9—The probability of exceeding these ranges is 1 in 100 when the within-batch coefficient of variation is 2.1 %. The 2.1 % is an average for laboratories participating in the portland cement and masonry cement reference sample programs of the Cement and Concrete Reference Laboratory.

13.3 If the range of three specimens exceeds the maximum in 13.2, discard the result which differs most from the average and check the range of the remaining two specimens. Make a retest of the sample if less than two specimens remain after discarding faulty specimens or discarding tests that fail to comply with the maximum permissible range of two specimens.

NOTE 10—Reliable strength results depend upon careful observance of all of the specified requirements and procedures. Erratic results at a given test period indicate that some of the requirements and procedures have not

been carefully observed; for example, those covering the testing of the specimens as prescribed in 10.6.2 and 10.6.3. Improper centering of specimens resulting in oblique fractures or lateral movement of one of the heads of the testing machine during loading will cause lower strength results.

**14. Precision and Bias**

14.1 *Precision*—The precision statements for this test method are listed in Table 2 and are based on results from the Cement and Concrete Reference Laboratory Reference Sample Program. They are developed from data where a test result is the average of compressive strength tests of three cubes molded from a single batch of mortar and tested at the same age. A significant change in precision will not be noted when a test result is the average of two cubes rather than three.

14.2 These precision statements are applicable to mortars made with cements mixed, and tested at the ages as noted. The appropriate limits are likely, somewhat larger for tests at younger ages and slightly smaller for tests at older ages.

14.3 *Bias*—The procedure in this test method has no bias because the value of compressive strength is defined in terms of the test method.


**15. Keywords**

15.1 compressive strength; hydraulic cement mortar; hydraulic cement strength; mortar strength; strength

**TABLE 2 Precision**

	Test Age, Days	Coefficient of Variation 1s % <sup>A</sup>	Acceptable Range of Test Results d2s % <sup>A</sup>
<b>Portland Cements</b>			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	Z	3.6	10.2
Av		3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	Z	6.4	18.1
Av		6.6	18.7
<b>Blended Cements</b>			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.8	10.7
Av	28	3.4	9.6
		3.8	10.7
Multi-lab	3	7.8	22.1
	7	7.6	21.5
Av	28	7.4	20.9
		7.6	21.5
<b>Masonry Cements</b>			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	28	7.5	21.2
Av		7.7	21.6
Multi-lab	7	11.8	33.4
	28	12.0	33.9
Av		11.9	33.7

<sup>A</sup> These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C 670.

 **C 109/C 109M**

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.*

# INFORME DE TESIS - JAVR

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1	<a href="https://repositorio.uct.edu.pe">repositorio.uct.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	2%
3	<a href="https://repositorioacademico.upc.edu.pe">repositorioacademico.upc.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.usanpedro.edu.pe">repositorio.usanpedro.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://renati.sunedu.gob.pe">renati.sunedu.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1%
9	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%

---

10	<a href="http://revistaalconpat.org">revistaalconpat.org</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://acikerisim.medipol.edu.tr">acikerisim.medipol.edu.tr</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://hoophangout.com">hoophangout.com</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
15	Juan Cosa Martínez. "Utilización de mezclas de residuos para la obtención de cementos de activación alcalina: aplicación en morteros y suelos estabilizados", Universitat Politecnica de Valencia, 2022 Publicación	<1 %
16	<a href="http://repositorio.uleam.edu.ec">repositorio.uleam.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
17	S. A. Bernal, R. Mejía de Gutiérrez, F. Ruiz, H. Quiñones, J. L. Provis. "Desempeño a temperaturas altas de morteros y hormigones basados en mezclas de escoria/metacaolín activadas alcalinamente", <i>Materiales de Construcción</i> , 2012 Publicación	<1 %

18

Fuente de Internet

&lt;1 %

19

Obaid Mahmoodi, Hocine Siad, Mohamed Lachemi, Sina Dadsetan, Mustafa Şahmaran. "Optimized application of ternary brick, ceramic and concrete wastes in sustainable high strength geopolymers", Journal of Cleaner Production, 2022

Publicación

&lt;1 %

20

[repositorio.umsa.bo](https://repositorio.umsa.bo)

Fuente de Internet

&lt;1 %

21

[repositorio.urp.edu.pe](https://repositorio.urp.edu.pe)

Fuente de Internet

&lt;1 %

22

Submitted to Universidad Ricardo Palma

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

23

[its.mx](https://its.mx)

Fuente de Internet

&lt;1 %

24

[plus.si.cobiss.net](https://plus.si.cobiss.net)

Fuente de Internet

&lt;1 %

25

[repositorio.unemi.edu.ec](https://repositorio.unemi.edu.ec)

Fuente de Internet

&lt;1 %

26

[www.hindawi.com](https://www.hindawi.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

27

[qdoc.tips](https://qdoc.tips)

Fuente de Internet

&lt;1 %

28	<a href="http://repositorio.upn.edu.pe">repositorio.upn.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
29	<a href="http://patents.google.com">patents.google.com</a> Fuente de Internet	<1 %
30	<a href="http://repositorio.untrm.edu.pe">repositorio.untrm.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
31	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
32	<a href="http://repositorio.upci.edu.pe">repositorio.upci.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
33	<a href="http://www.pinterest.com">www.pinterest.com</a> Fuente de Internet	<1 %
34	<a href="http://stg.unenvironment.org">stg.unenvironment.org</a> Fuente de Internet	<1 %
35	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
36	Renata Różyło, Monika Wójcik, Beata Biernacka, Dariusz Dziki. "Gluten-free crispbread with freeze-dried blackberry: quality and mineral composition", CyTA - Journal of Food, 2019 Publicación	<1 %
37	Submitted to Universidad de artes, ciencias y comunicación UNIACC Trabajo del estudiante	<1 %

38	<a href="https://multimedia.elsevier.es">multimedia.elsevier.es</a> Fuente de Internet	<1 %
39	<a href="https://repositorio.ecci.edu.co">repositorio.ecci.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
40	<a href="https://repository.unab.edu.co">repository.unab.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
41	<a href="https://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	<1 %
42	<a href="https://www.theinsightpartners.com">www.theinsightpartners.com</a> Fuente de Internet	<1 %
43	<a href="https://dide.minedu.gob.pe">dide.minedu.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
44	<a href="https://repositorio.cuc.edu.co">repositorio.cuc.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
45	<a href="https://www.ut.edu.co">www.ut.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
46	"Territorialidad en construcción : el caso de la colonización residencial del espacio rural en la Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana (1980-2020)", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022 Publicación	<1 %
47	Ana Curutchet González. "Uso de subproductos de la industria agroalimentaria como fuente de fibra. Respuesta de los	<1 %

# consumidores", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

---

48 Submitted to Universidad Santo Tomas <1 %  
Trabajo del estudiante

---

49 Submitted to Universidad de Jaén <1 %  
Trabajo del estudiante

---

50 www.concretonline.com <1 %  
Fuente de Internet

---

51 www.grafiati.com <1 %  
Fuente de Internet

---

52 www.translate.ru <1 %  
Fuente de Internet

---

53 Submitted to Universidad Autónoma de Ciudad Juárez <1 %  
Trabajo del estudiante

---

54 link.springer.com <1 %  
Fuente de Internet

---

55 prezi.com <1 %  
Fuente de Internet

---

56 www.clubensayos.com <1 %  
Fuente de Internet

---

57 www.ief.es <1 %  
Fuente de Internet

---

www.jove.com



58

Fuente de Internet

<1 %

59

[americanae.aecid.es](http://americanae.aecid.es)

Fuente de Internet

<1 %

60

[es.slideshare.net](http://es.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

61

[issuu.com](http://issuu.com)

Fuente de Internet

<1 %

62

[pdfs.semanticscholar.org](http://pdfs.semanticscholar.org)

Fuente de Internet

<1 %

63

[worldwidescience.org](http://worldwidescience.org)

Fuente de Internet

<1 %

64

[www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía

Activo