



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Revisión de literatura sobre el uso de fibras en  
geopolímeros y su potencial de aplicación en la reparación  
de estructuras de concreto**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

**Fatima Ximena Mellado Gomez**

**Asesor:**  
**Mgtr. Ing. David Israel Castañeda Granda**

Piura, enero de 2026

### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Fatima Ximena Mellado Gomez, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 72295362, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

**"Revisión de literatura sobre el uso de fibras en geopolímeros y su potencial de aplicación en la reparación de estructuras de concreto"**

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número
- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número
- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número
- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. David Israel Castañeda Granda, identificado con DNI: 71314546
- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número
- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con Elija un elemento: Escribir número

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 01/01/2026.



Firma del autor<sup>1</sup>



Firma del asesor<sup>2</sup>

Firma del co-asesor<sup>2</sup>

Firma del co-asesor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

## **Dedicatoria**

A mis padres, Aldo y Ana, cuyo amor, sacrificio y ejemplo han sido la base de todo lo que soy, siempre diré que son mis héroes sin capa y espero hacerlos sentir orgullosos.

A mis hermanos, Geremy y Thiago, para mostrarles que todo es posible con perseverancia y esfuerzo. Y recordarles que, en cada paso que den, siempre contarán con mi apoyo.

A mis abuelos, papá Will, mamá Lucha, papá Kiko y mamá Yola, a quienes tengo la dicha y el privilegio de tener conmigo; por su cariño, sus consejos y por ser una fuente constante de fortaleza en mi vida.

A toda mi familia, por estar presente en cada etapa, celebrando mis logros y sosteniéndome en mis desafíos.

A mis amigos del colegio que estuvieron presentes en mi etapa universitaria, por darme un respiro de lo que era la carrera y siempre hacerme reír.

A mis amigos de la universidad, mis futuros colegas, por demostrarme que todo es posible y que el camino se vuelve más ligero y valioso cuando se comparte con las personas correctas.

Y finalmente, a mí, porque aun cuando quise rendirme, reuní lo que quedaba de fuerza para seguir adelante; por darlo todo, incluso en los días más difíciles, y por creer en la persona que soy y en la que aún puedo llegar a ser.

## **Agradecimientos**

A Dios, por guiarme con paciencia y fortaleza en cada paso de este camino y por darme claridad cuando la incertidumbre pesaba.

A mis padres, Aldo y Ana, por su amor incondicional, por ser el pilar que me ha sostenido siempre y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. Nada de esto habría sido posible sin su apoyo constante. Los amo.

Al Ing. Castañeda, mi asesor, por su orientación, paciencia y dedicación. Su guía fue fundamental para el desarrollo de esta investigación, y agradezco profundamente el tiempo que brindó y cada consejo que contribuyó a mejorar este trabajo.

A mis seres queridos, cuya presencia, cariño y fortaleza emocional fueron un sostén invaluable durante todo este camino. Y a todas las personas que, de una u otra forma, formaron parte de este proceso.

A todos ustedes, muchas gracias.

## Resumen

Frente al panorama de reducir el alto impacto ambiental del Cemento Portland (CP), los geopolímeros han emergido como una alternativa prometedora como material sostenible. No obstante, su limitación intrínseca radica en su tendencia a la fragilidad y a la formación de fisuras por retracción, lo que compromete su desempeño estructural. La incorporación de fibras se plantea como una estrategia eficaz para mejorar la resistencia y durabilidad del material. El propósito de este trabajo es, por lo tanto, compilar la información disponible sobre las fibras utilizadas en geopolímeros y valorar su desempeño en aplicaciones de reparación estructural en comparación con materiales tradicionales, para consolidar el conocimiento que oriente futuras investigaciones en este campo.

La investigación empleó una revisión bibliográfica sistemática con búsquedas entre 2010 y 2025 en bases de datos especializadas y normas técnicas internacionales. Los hallazgos principales de la revisión identificaron que las fibras naturales ofrecen sostenibilidad, pero requieren tratamiento superficial para mejorar la adherencia; las sintéticas, destacan por su durabilidad y control de fisuración; y las minerales, se caracterizan por su alta rigidez y estabilidad química.

En términos mecánicos, las fibras pueden aumentar la resistencia a la compresión, dependiendo del tipo y contenido. Las fibras minerales (basalto) y sintéticas (PVA) mantienen o mejoran el módulo de elasticidad. Respecto a la durabilidad, las fibras, especialmente polipropileno (PP) y basalto, reducen consistentemente la retracción por secado y la fluencia. Además, mejoran notablemente la resistencia al congelamiento y deshielo, y la resistencia química. En cuanto al desempeño como material de reparación, los ensayos de adherencia entre el geopolímero y el concreto revelan que los compuestos ricos en escoria granulada (GGBS), y reforzados con fibras sintéticas (PVA, Polietileno (PE)), logran resistencias de unión superiores a las de los sistemas de cemento Portland. El desempeño es tan favorable que la falla ocurre a menudo en el sustrato de concreto existente en lugar de en la interfaz de reparación. Las conclusiones muestran que los geopolímeros reforzados con fibras constituyen un material de reparación altamente competitivo y, en muchas métricas, superior al cemento Portland. Se confirma que las fibras mejoran de manera significativa sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Además, la evidencia muestra que, con diseños optimizados, los geopolímeros superan ampliamente al cemento Portland en adherencia interfacial, resistencia química y control de fisuras.

El principal aporte de esta investigación es ofrecer una visión integral y actualizada sobre el potencial de los geopolímeros reforzados con fibras como alternativa sostenible y eficaz para la reparación de estructuras de concreto. Esto refuerza la urgencia de promover materiales de reparación más sostenibles que reduzcan la dependencia del CP y mitiguen su impacto ambiental.

## Tabla de contenido

Introducción .....	10
Capítulo 1 Marco teórico.....	12
1.1 Geopolímeros .....	12
1.1.1 Geopolimerización .....	12
1.1.2 Materiales precursores para la síntesis de geopolímeros .....	14
1.2 Tipos de fibras utilizadas en geopolímeros .....	15
1.2.1 Fibras naturales .....	15
1.2.2 Fibras sintéticas .....	17
1.2.3 Fibras minerales.....	18
1.3 Propiedades de interés para reparación estructural .....	21
1.3.1 Retracción por secado .....	21
1.3.2 Resistencia mecánica a compresión .....	21
1.3.3 Módulo de elasticidad (E) .....	21
1.3.4 Adherencia.....	21
1.3.5 Fluencia (creep) .....	22
1.3.6 Permeabilidad / Absorción capilar .....	22
1.3.7 Congelamiento y deshielo.....	22
1.3.8 Resistencia química .....	22
1.3.9 Resistencia a la carbonatación.....	23
Capítulo 2 Metodología de investigación.....	24
2.1 Definición de los criterios de búsqueda .....	24
2.1.1 Definición de palabras clave .....	24
2.1.2 Temporalidad.....	24
2.1.3 Tipo de documento .....	25
2.1.4 Idioma.....	25
2.1.5 Relevancia temática .....	25
2.2 Estrategia de búsqueda y selección de fuentes de información.....	25
2.3 Organización de los resultados.....	27
Capítulo 3 Resultados.....	29
3.1 Propiedades físicas y mecánicas.....	29
3.1.1 Resistencia a la compresión .....	31
3.1.2 Módulo de elasticidad (E) .....	36
3.1.3 Retracción por secado .....	38
3.1.4 Fluencia (creep) .....	39
3.2 Propiedades de durabilidad.....	42
3.2.1 Permeabilidad.....	42
3.2.2 Congelamiento y deshielo.....	44
3.2.3 Resistencia química .....	48
3.2.4 Resistencia a la carbonatación .....	51
3.3 Propiedades microestructurales y adherencia fibra-matriz.....	54
3.3.1 Adherencia .....	54
3.4 Adherencia en concreto .....	59
3.5 Comparación con sistemas tradicionales de reparación.....	71
Conclusiones.....	74
Recomendaciones .....	75
Lista de abreviaturas .....	76

Referencias..... 77



## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Tipos de geopolímeros según su relación molar de Si:Al.....	13
<b>Tabla 2</b> Principales ventajas y limitaciones de los tipos de fibras .....	20
<b>Tabla 3</b> Valores reportados de resistencia a compresión en concretos geopoliméricos reforzados con fibra sintética y sin fibra .....	35
<b>Tabla 4</b> Influencia del volumen de la fibra con distintas matrices de base en el módulo de Young.....	38
<b>Tabla 5</b> Métricas de fluencia reportadas en distintos estudios en geopolímeros con fibras..	41
<b>Tabla 6</b> Métricas de congelamiento-deshielo reportadas en distintos estudios en geopolímeros con fibras.....	47
<b>Tabla 7</b> Indicadores representativos de resistencia química en geopolímeros sin fibra y con fibra incorporada basándose en pérdida de masa o retención de resistencia.....	50
<b>Tabla 8</b> Tabla resumen de datos relevantes de la adherencia según los ensayos realizados .	68



## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Etapas principales de la geopolimerización .....	13
<b>Figura 2</b> Ilustraciones de los materiales precursores .....	18
<b>Figura 3</b> Ilustraciones de las fibras naturales.....	17
<b>Figura 4</b> Ilustraciones de las fibras sintéticas.....	19
<b>Figura 5</b> Ilustraciones de las fibras minerales .....	20
<b>Figura 6</b> Esquema de la búsqueda y selección de las fuentes bibliográficas.....	27
<b>Figura 7</b> Cantidad de publicaciones sobre fibras incorporadas en concretos a base de geopolímeros en ScienceDirect.....	30
<b>Figura 8</b> Comparación del consumo de energía y emisión de CO <sub>2</sub> entre el cemento Portland y geopolímeros con fibras incorporadas.....	31
<b>Figura 9</b> Comparación de resistencia a compresión (MPa) sin y con fibra natural .....	32
<b>Figura 10</b> Impacto de la longitud y contenido de fibra en la resistencia a compresión de fibras naturales.....	33
<b>Figura 11</b> Comportamiento del módulo de elasticidad de cada fibra según el porcentaje de fibra .....	37
<b>Figura 12</b> Comparativa de retracción por secado a 7 y 28 días de geopolímeros con varios tipos de fibra y sin fibra.....	40
<b>Figura 13</b> Absorción de agua vs. contenido de cáñamo .....	43
<b>Figura 14</b> Resultados de un Ensayo Rápido de Permeabilidad a los Cloruros según el contenido de cáñamo.....	44
<b>Figura 15</b> Durabilidad del geopolímero con fibra incorporada ante ciclos de congelamiento y descongelamiento reportada en diversos artículos.....	47
<b>Figura 16</b> Coeficientes de carbonatación vs tipo de fibra incorporado según estudio reportado .....	53
<b>Figura 17</b> Efecto del agua atrapada en la interfaz fibra natural-matriz geopolimérica.....	56
<b>Figura 18</b> Interacción débil de fibra-matriz.....	56
<b>Figura 19</b> Microscopía de fibras de carbón en la matriz geopolimérica.....	57
<b>Figura 20</b> Imagen SEM de la superficie de fractura del compuesto geopolimérico reforzado con fibra de vidrio al 1 wt%, 6 mm .....	58
<b>Figura 21</b> Imagen SEM de la superficie de fractura del compuesto geopolimérico reforzado con fibra de vidrio al 2 wt%, 6 mm .....	58
<b>Figura 22</b> Esquema del espécimen cilíndrico de corte inclinado, que muestra la interfaz inclinada a 30° del GC al NC .....	61
<b>Figura 23</b> Imagen del espécimen antes y después de la falla en el sustrato de concreto.....	61
<b>Figura 24</b> Molde para las probetas de unión entre el geopolímero y el concreto existente ..	62
<b>Figura 25</b> Montaje de la prueba de corte directo en especímenes cúbicos de doble lado unido.....	62
<b>Figura 26</b> Modos de falla de los especímenes de corte directo .....	63
<b>Figura 27</b> Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para las probetas NMX .....	65
<b>Figura 28</b> Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para distintos tipos de probetas ...	66
<b>Figura 29</b> Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para distintos tipos de probetas ...	66
<b>Figura 30</b> Imágenes en dos y tres dimensiones de las muestras tratadas con la técnica de rugosidad manual.....	67
<b>Figura 31</b> Imágenes en dos y tres dimensiones de las muestras tratadas con la técnica de rugosidad chorro de arena.....	67

## Introducción

La industria de la construcción enfrenta un desafío ambiental y técnico debido al uso constante del cemento Portland (CP). Este material, fundamental en la mayoría de obras civiles, es responsable de entre un 5 % y un 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono, lo que lo convierte en uno de los principales contribuyentes al cambio climático (Habert et al., 2020). Su fabricación exige altos consumos de energía asociados a la calcinación de la piedra caliza y al uso de combustibles fósiles, lo que refuerza su impacto negativo en el medio ambiente (Scrivener et al., 2018). A pesar de su amplia utilización en la construcción y reparación de estructuras de concreto, continúa siendo un material con un peso considerable en la crisis ambiental actual (Ahmad et al., 2020).

Frente a este panorama, los geopolímeros han emergido como una alternativa prometedora. Obtenidos a partir de la activación alcalina de aluminosilicatos, han demostrado un menor impacto ambiental y propiedades mecánicas y de durabilidad competitivas (Davidovits, 2020; Provis, 2013). Sin embargo, una de sus principales limitaciones es la tendencia a la fragilidad y a la formación de fisuras por retracción, lo que compromete su desempeño en aplicaciones estructurales (Silva et al., 2019; Castañeda et al., 2020). Para superar estas limitaciones, la incorporación de fibras ha sido planteada como una estrategia eficaz, ya que mejora la resistencia mecánica, la tenacidad y la durabilidad del material (Ranjbar & Zhang, 2020; Camargo et al., 2020).

Investigaciones recientes muestran que fibras como las de vidrio, carbono, polipropileno y fibras naturales pueden mitigar problemas de fisuración y fragilidad, lo que amplía sus posibilidades de aplicación en ambientes agresivos (Guo et al., 2022). Además, se ha reportado que los geopolímeros reforzados con fibras poseen un desempeño favorable en condiciones de reparación, al presentar buena adherencia y resistencia mecánica cuando se aplican sobre estructuras de concreto con cemento Portland (Ahmad et al., 2020; Chan & Zhang, 2022). No obstante, aunque existen numerosos estudios sobre geopolímeros y sobre el refuerzo con fibras, aún no se dispone de una revisión de literatura que integre ambas perspectivas en el contexto específico de la reparación estructural.

La presente investigación se justifica en la necesidad de consolidar el conocimiento existente y de proporcionar un marco de referencia que oriente futuros estudios. Al mismo tiempo, responde a la urgencia de promover materiales de reparación más sostenibles, capaces de reducir la dependencia del cemento Portland y, con ello, mitigar su impacto ambiental. La hipótesis que guía este trabajo es que la incorporación de fibras en matrices geopoliméricas potencia sus propiedades mecánicas y de durabilidad, incrementando su idoneidad como material de reparación de estructuras de concreto expuestas a condiciones ambientales adversas.

El propósito de esta tesis es compilar y analizar la información disponible acerca de las fibras utilizadas en geopolímeros, con énfasis en su aplicación en la reparación de estructuras.

Se busca comprender tanto las propiedades mecánicas y de durabilidad que aportan las fibras como las aplicaciones prácticas documentadas, a fin de valorar su desempeño en comparación con materiales tradicionales.

En cuanto a su organización, el trabajo se estructura de manera que se pueda recorrer de lo general a lo específico. El primer capítulo desarrolla el marco teórico, en el que se exponen los fundamentos de los geopolímeros, los tipos de fibras estudiados y las propiedades relevantes para la reparación estructural. El segundo capítulo describe la metodología adoptada, que incluye los criterios de búsqueda, selección y análisis de la literatura académica y técnica. El tercer capítulo presenta los resultados de la revisión, organizados en torno a las propiedades mecánicas, de durabilidad y microestructurales, así como a las aplicaciones en reparación estructural, incluyendo la comparación con sistemas convencionales de reparación. Finalmente, las conclusiones sintetizan los hallazgos más significativos, discuten las ventajas y limitaciones de los geopolímeros reforzados con fibras y proponen futuras líneas de investigación.

De esta manera, en el presente trabajo se encontrará una visión integral y actualizada sobre el potencial de los geopolímeros reforzados con fibras como alternativa sostenible y eficaz para la reparación de estructuras de concreto.



## Capítulo 1

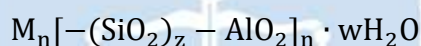
### Marco teórico

En este capítulo se presenta inicialmente una revisión sobre los geopolímeros, abordando su definición, composición y relevancia como alternativa a los materiales cementicios convencionales. Luego, se profundiza en los diferentes tipos de fibras que se han incorporado a estos compuestos, destacando cómo cada una de ellas contribuye a mejorar su desempeño. Finalmente, se analizan las propiedades que resultan de especial interés para los materiales que se utilizan en reparación estructural, considerando tanto aspectos mecánicos como de durabilidad, lo cual permitirá comprender el potencial de estos materiales en este campo.

#### 1.1 Geopolímeros

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos tridimensionales basados en aluminosilicatos que se obtienen mediante una reacción de polimerización en un medio altamente alcalino. En esta reacción, los átomos de silicio (Si) y aluminio (Al) presentes en la materia prima se disuelven, se transportan y finalmente se condensan para formar una red polimérica tridimensional (Davidovits, 1989).

Según Davidovits (1991), la estructura química general de un geopolímero se representa por la fórmula empírica:



Donde M corresponde a un catión alcalino ( $Na^+$ ,  $K^+$  o  $Ca^{2+}$ ), n es el grado de polimerización o policondensación, z un entero (1, 2 o 3) y w el número de moléculas de agua de hidratación.

Como se muestra en la Tabla 1, de acuerdo con su relación molar de Si:Al, los geopolímeros pueden clasificarse en tres formas básicas: poli(sialato), poli(sialato-siloxo), y poli(sialato-disiloxo) (Davidovits, 1989).

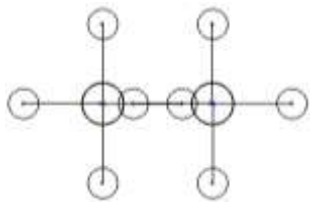
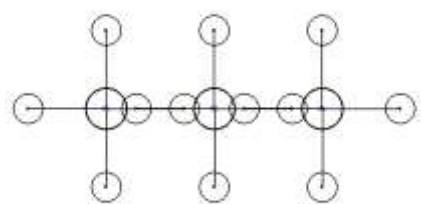
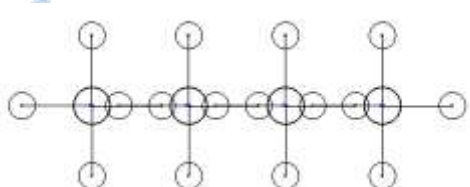
##### 1.1.1 Geopolimerización

La geopolimerización es un proceso de reacción química en medio alcalino que convierte materias primas ricas en aluminosilicatos en un polímero inorgánico tridimensional. Este proceso, introducido por Davidovits (1991), se distingue de la hidratación del cemento Portland porque en lugar de formar productos cristalinos como el gel C-S-H, genera una matriz amorfa de aluminosilicatos que proporciona propiedades mecánicas y de durabilidad superiores (Davidovits, 2020).

En términos generales, la reacción ocurre en cuatro etapas principales: disolución, transporte, policondensación y endurecimiento (Ver Figura 1).

**Tabla 1**

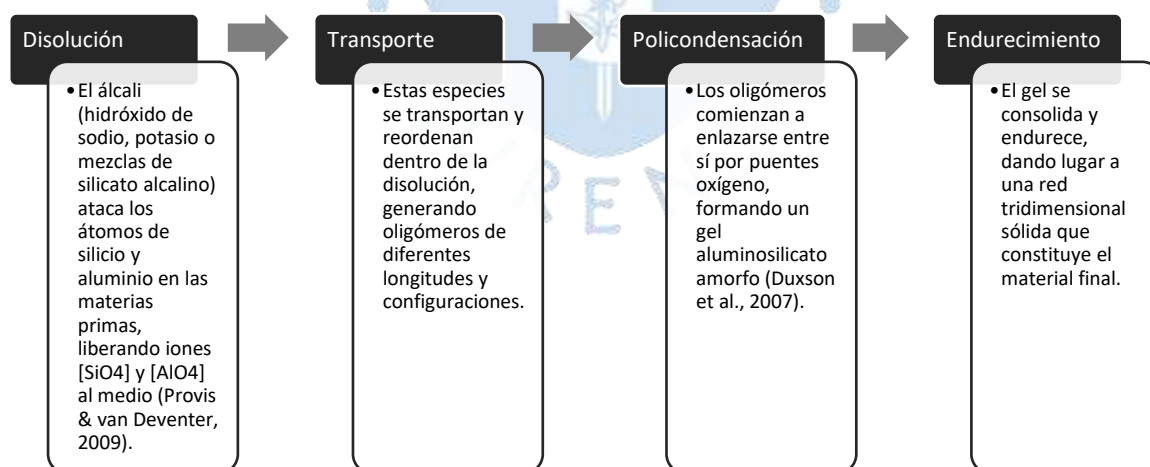
*Tipos de geopolímeros según su relación molar de Si:Al*

Relación Si:Al	Nombre (término)	Unidad repetitiva	Representación gráfica
1:1	Poli(sialato)	$[-\text{Si-O-Al-O-}]$	
2:1	Poli(sialato-siloxo)	$[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$	
3:1	Poli(sialato-disiloxo)	$[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$	

*Nota.* Adaptado y modificado de Silva, G. (2018).

**Figura 1**

*Etapas principales de la geopolimerización*



Esta característica hace que los geopolímeros no solo posean buena resistencia a compresión, sino también alta durabilidad frente a ataques químicos, estabilidad térmica y menor huella de carbono respecto al cemento Portland (Provis & Van Deventer, 2009; Duxson et al., 2007).

### 1.1.2 Materiales precursores para la síntesis de geopolímeros

La síntesis de geopolímeros se basa en la activación alcalina de materiales precursores que son intrínsecamente ricos en alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ), compuestos que se encuentran en una fase amorfa de fácil disolución (Castañeda, 2019). Estas materias primas son denominadas precursores y suelen ser subproductos industriales o residuos con un potencial significativo para la sostenibilidad en la construcción (Silva, 2018). A continuación, se describen los principales precursores reportados en la literatura y considerados en el marco teórico de la presente investigación.

**1.1.2.1 Ceniza volante.** La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas termoeléctricas. Su composición incluye altas proporciones de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y en menor cantidad  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  (Provis & Van Deventer, 2009). Debido a su disponibilidad a gran escala y su reactividad, la ceniza volante (FA, por sus siglas en inglés), ha sido uno de los precursores más estudiados para la síntesis de geopolímeros (Duxson et al., 2007). (Ver Figura 2a)

**1.1.2.2 Metacaolín.** El metacaolín (MK, por sus siglas en inglés) se obtiene mediante la calcinación del caolín a temperaturas de 600 - 800 °C, proceso que transforma la estructura cristalina en una fase amorfa altamente reactiva (Davidovits, 2020). Su elevado contenido de sílice y alúmina lo convierte en un precursor de gran pureza y excelente desempeño en la formación de matrices geopoliméricas, capaces de alcanzar altas resistencias mecánicas y buena durabilidad. (Ver Figura 2b)

**1.1.2.3 Escoria granulada de alto horno molida.** La escoria granulada de alto horno (GGBS, por sus siglas en inglés) es un subproducto metalúrgico de la producción de hierro y acero. Contiene principalmente  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , lo cual le confiere propiedades cementicias y potencial de activación alcalina (Habert et al., 2020). Al combinarse con FA o MK, la escoria puede mejorar las propiedades mecánicas y la velocidad de reacción de los geopolímeros. (Ver Figura 2c)

**1.1.2.4 Relaves de minería.** Los relaves de minería, puede considerarse un precursor alternativo, con un alto potencial para la producción de geopolímeros por su contenido de sílice y alúmina, y en algunos casos, cantidades significativas de óxidos de hierro y calcio. Su uso representa una estrategia sostenible de gestión de residuos mineros y una vía para desarrollar materiales de construcción con menor huella ambiental, aunque requiere un control estricto de composición y seguridad. (Ver Figura 2d)

**1.1.2.5 Polvo de ladrillo de arcilla cocida (FCBP, por sus siglas en inglés).** Estos residuos provienen de piezas cerámicas sometidas previamente a altas temperaturas, lo cual genera una fase amorfa rica en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Según Silva (2018), el FCBP presenta un potencial significativo como precursor, ya que combina buena reactividad en medio alcalino

con la ventaja ambiental de reutilizar desechos de la industria de la construcción. (Ver Figura 2e)

**1.1.2.6 Puzolana natural (NP, por sus siglas en inglés).** Las puzolanas naturales, como cenizas volcánicas y tobas, son materiales silíceos y aluminosos que han sido empleados desde la antigüedad en mezclas cementicias. Su efectividad depende de la proporción de sílice y alúmina en fase amorfa. Su composición química es un factor determinante en la calidad del geopolímero resultante (Castañeda, 2019). En regiones como el Perú, la abundancia de estos materiales ofrece una alternativa viable para la producción de geopolímeros (Palomo et al., 1999). (Ver Figura 2f)

## **1.2 Tipos de fibras utilizadas en geopolímeros**

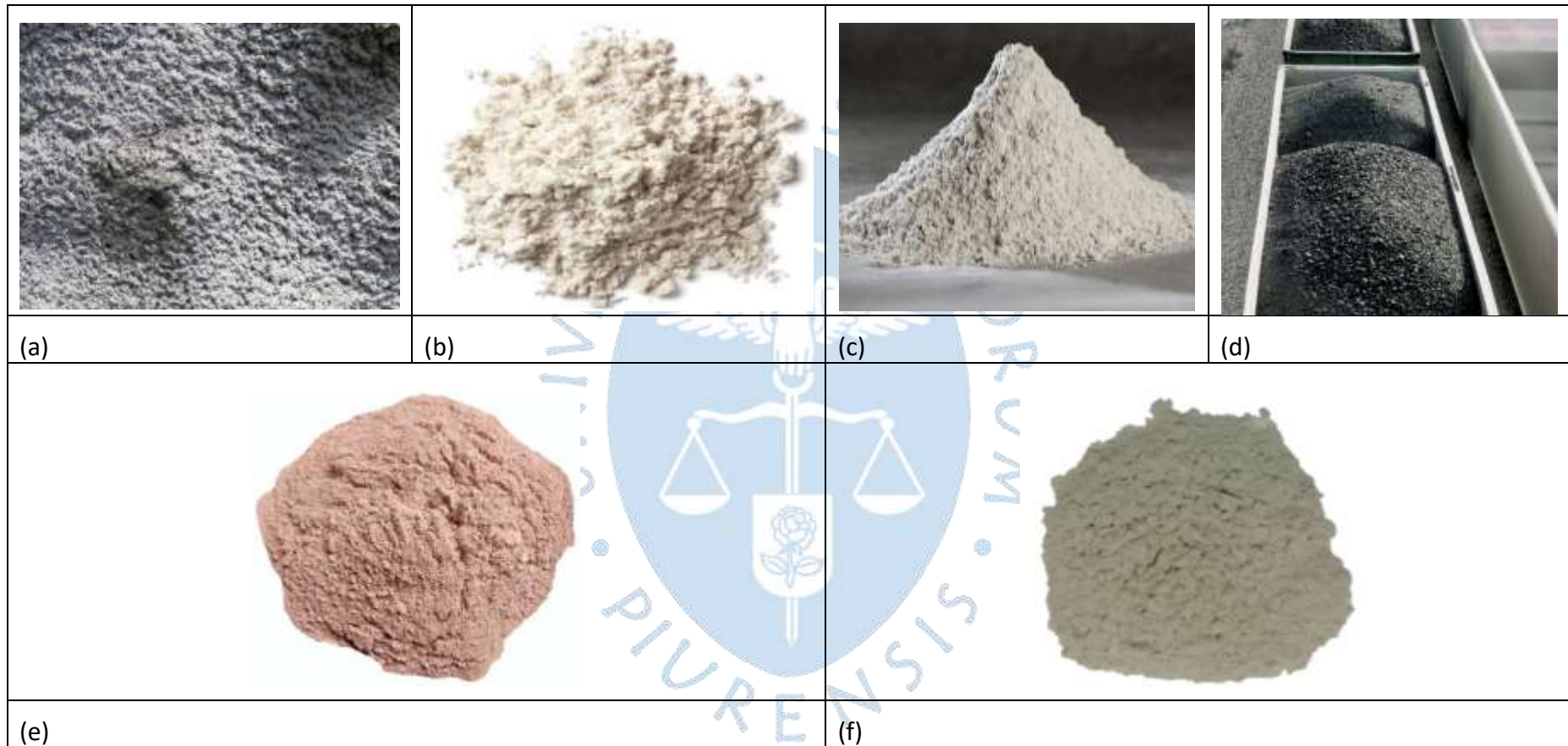
El refuerzo de matrices geopoliméricas con fibras ha emergido como una estrategia efectiva para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Los geopolímeros, al igual que el concreto Portland, se caracterizan por un comportamiento frágil frente a cargas de tracción y flexión, lo cual limita su aplicación en elementos estructurales. Para superar esta limitación, en la última década se ha incrementado el interés en el uso de fibras de refuerzo, capaces de mejorar la ductilidad, controlar la fisuración y aumentar la resistencia mecánica global del material (Silva et al., 2020; Ranjbar & Zhang, 2020).

### **1.2.1 Fibras naturales**

Las fibras naturales provienen de fuentes vegetales y animales, y presentan ventajas ambientales y económicas frente a las sintéticas: son biodegradables, renovables, de bajo costo y requieren menor consumo energético para su procesamiento (Xie et al., 2010), además de su compatibilidad con materiales de matriz inorgánica (Camargo et al., 2020). Sin embargo, su variabilidad natural, la sensibilidad a la humedad y la degradación biológica constituyen limitaciones a considerar (Savastano et al., 2000).

**1.2.1.1 Fibra de yute.** El yute es una fibra lignocelulósica con alta disponibilidad en regiones tropicales. Posee una resistencia a la tracción promedio de 250 - 350 MPa y un módulo de elasticidad de 10 - 30 GPa, lo que la hace adecuada como refuerzo en materiales frágiles (Bledzki & Gassan, 1999). En matrices geopoliméricas, el yute mejora la resistencia a la flexión y retrasa la propagación de grietas (Tonoli et al., 2010). (Ver Figura 3a)

**1.2.1.2 Fibra de sisal.** El sisal es ampliamente utilizado en Latinoamérica y África. Presenta una resistencia a la tracción de 350 - 700 MPa y un módulo de elasticidad de 9 - 22 GPa (Pickering et al., 2016). Su incorporación en geopolímeros reduce la fragilidad del material y mejora su comportamiento bajo cargas cíclicas. Silva (2018) evaluó también la fibra de sisal, cuyos resultados evidenciaron mejoras en la tenacidad y capacidad post-fisuración de la matriz. (Ver Figura 3b)

**Figura 2***Ilustraciones de los materiales precursores*

*Nota.* (a) Imagen adaptada de Bozok (2025), (b) Imagen adaptada de Kumar et al. (2023), (c) Imagen adaptada de Yang et al. (2022), (d) Imagen adaptada de Vargas (2023), (e) Imagen adaptada de Rguibi et al. (2018) y (f) Imagen adaptada de Castañeda (2019).

**1.2.1.3 Fibra de lino y cáñamo.** Ambas fibras tienen alto contenido de celulosa, lo que les confiere excelentes propiedades mecánicas. En estudios de refuerzo de geopolímeros, han mostrado incrementos en la resistencia a flexión y mayor durabilidad frente a ataques químicos (Assaedi et al., 2015). (Ver **Figura 3c**)

**1.2.1.4 Fibra de algodón.** El algodón, aunque presenta menor resistencia comparado con el yute o sisal, ofrece una alta flexibilidad y buena adherencia con la matriz. Se emplea en aplicaciones no estructurales y en morteros ecológicos (Mohanty et al., 2000). (Ver **Figura 3d**)

### Figura 3

*Ilustraciones de las fibras naturales*



*Nota.* (a) Imagen adaptada de Aceves et al. (2018), (b) Imagen adaptada de Guru et al. (2021), (c) Imagen adaptada de Cajigas (2019) y (d) Imagen adaptada de Hernández-Leal et al. (2022).

### 1.2.2 Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas son manufacturadas mediante procesos industriales controlados, lo que permite obtener propiedades mecánicas consistentes. Su principal ventaja frente a las naturales es la durabilidad, menor absorción de agua y mayor resistencia química. No

obstante, presentan un mayor costo y un impacto ambiental superior debido a su origen petroquímico (Lau & Cheung, 2017).

**1.2.2.1 Polipropileno (PP).** Las fibras de PP son las más utilizadas en morteros y concretos, debido a su bajo costo y alta resistencia química. Aunque su módulo de elasticidad (3 - 5 GPa) es inferior al de las fibras naturales, su capacidad de controlar la fisuración por retracción plástica es ampliamente reconocida (Bentur & Mindess, 2006). (Ver Figura 4a)

**1.2.2.2 Aramidas (Kevlar).** Las fibras de aramida destacan por su alta resistencia específica y excelente estabilidad térmica. Su resistencia a impactos y vibraciones las hace idóneas para refuerzos en estructuras sometidas a solicitaciones dinámicas (Chandramohan & Marimuthu, 2011). (Ver Figura 4b)

**1.2.2.3 Alcohol polivinílico (PVA).** El uso de estas fibras en matrices geopoliméricas ha demostrado mejorar significativamente la tenacidad y la rigidez del material. Estas fibras presentan una buena compatibilidad química con medios alcalinos, además de un módulo de elasticidad relativamente alto (aproximadamente de entre 20 a 40 GPa), lo que contribuye a aumentar el módulo de elasticidad del compuesto final (Deng et al., 2022). (Ver Figura 4c)

### **1.2.3 Fibras minerales**

Las fibras minerales constituyen un grupo particular dentro de los materiales de refuerzo para matrices cementicias y geopoliméricas. Se caracterizan por su origen inorgánico, elevada resistencia térmica y buena estabilidad química. Aunque su aplicación ha sido más limitada en comparación con fibras naturales y sintéticas, existen investigaciones que demuestran su potencial en el refuerzo de materiales de construcción.

**1.2.3.1 Fibras de basalto.** Las fibras de basalto se obtienen a partir de la fusión de rocas volcánicas a altas temperaturas, lo que produce hilos continuos de gran resistencia mecánica y durabilidad. Presentan una resistencia a la tracción en el rango de 2000 - 4000 MPa y un módulo elástico de 85 - 90 GPa (Dias & Thaumaturgo, 2005). En matrices geopoliméricas, el basalto mejora la resistencia al impacto y la durabilidad frente a agentes agresivos. (Ver Figura 5a)

**1.2.3.2 Fibras de wollastonita.** La wollastonita es un silicato de calcio que cristaliza en forma de agujas finas y puede utilizarse como refuerzo natural en compuestos cementicios. Aporta propiedades de refuerzo dimensional y resistencia a la fisuración, además de mejorar la estabilidad térmica de las matrices (Pacheco & Jalali, 2011). (Ver Figura 5b)

**1.2.3.3 Fibra de vidrio.** La fibra de vidrio posee una resistencia a la tracción de 2000 - 3500 MPa y un módulo de elasticidad de 70 GPa. En geopolímeros, mejora notablemente la

resistencia mecánica, aunque puede ser susceptible a ataques alcalinos si no se emplean fibras con recubrimiento especial (Silva et al., 2011). (Ver Figura 5c)

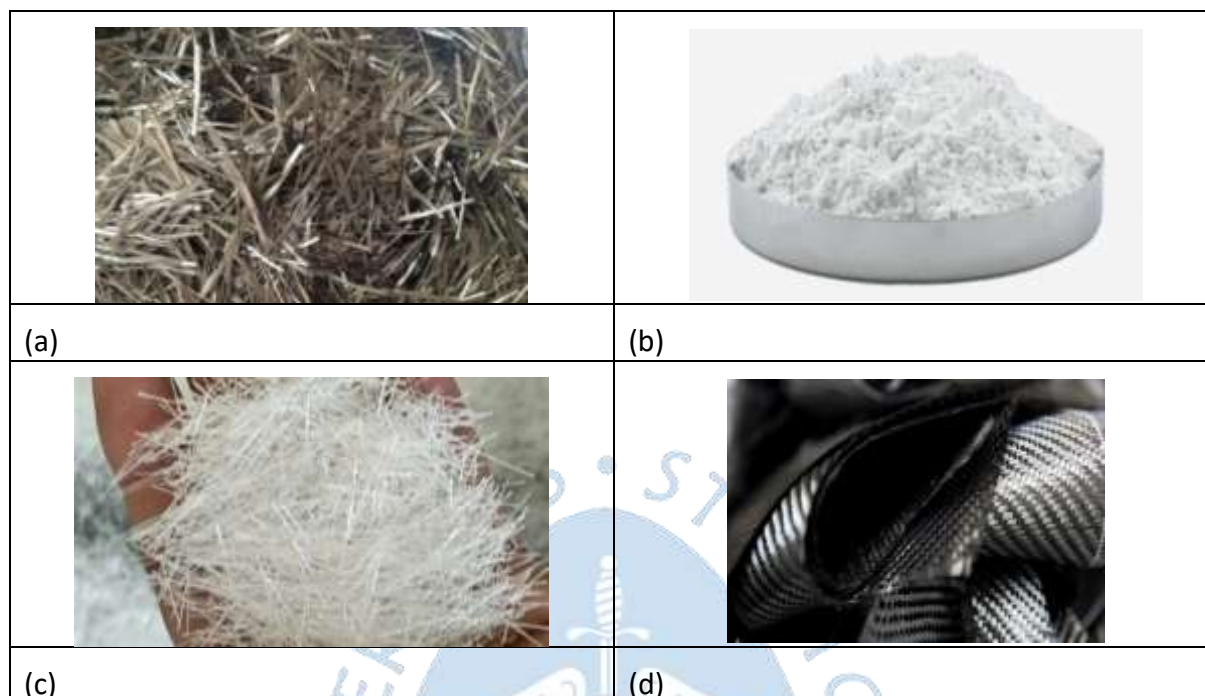
**1.2.3.4 Fibra de carbono.** Caracterizada por una resistencia a la tracción superior a 3000 MPa y un módulo de hasta 250 GPa, la fibra de carbono proporciona un excelente refuerzo, especialmente en aplicaciones estructurales de alto desempeño (Balaguru, 1992). Su alto costo limita su uso en proyectos convencionales. (Ver Figura 5d)

**Figura 4**

*Ilustraciones de las fibras sintéticas*



*Nota.* (a) Imagen adaptada de Bentur & Mindess (2006), (b) Imagen adaptada de Chandramohan & Marimuthu (2011) y (c) Imagen adaptada de Deng et al. (2022).

**Figura 5***Ilustraciones de las fibras minerales*

*Nota.* (a) Imagen adaptada de Dias & Thaumaturgo (2005), (b) Imagen adaptada de Pacheco Torgal & Jalali (2011), (c) Imagen adaptada de Silva et al. (2011), (d) Imagen adaptada de Theurer (2016).

En la Tabla 2 se resume las ventajas y limitaciones de las fibras en geopolímeros.

**Tabla 2***Principales ventajas y limitaciones de los tipos de fibras*

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
Naturales	Biodegradables, renovables, bajo costo, buena adherencia con la matriz	Sensibles a humedad, degradación biológica, variabilidad en propiedades
Sintéticas	Alta durabilidad, propiedades consistentes, resistencia química y mecánica elevada	Mayor costo, impacto ambiental, origen petroquímico
Minerales	Alta resistencia térmica, estabilidad química, durabilidad	Menor disponibilidad, costoso en algunos casos, riesgos para la salud en fibras históricas (asbesto)

### **1.3 Propiedades de interés para reparación estructural**

La reparación del concreto armado se entiende como un conjunto de técnicas que buscan recuperar las condiciones originales de una estructura afectada por el tiempo, el ambiente o el uso. Además, este proceso implica considerar la compatibilidad entre el concreto existente y el material aplicado para evitar fallas posteriores. Según el ACI (2014), una reparación adecuada debe asegurar tanto la funcionalidad estructural como la durabilidad a largo plazo.

#### **1.3.1 Retracción por secado**

La retracción por secado corresponde a la reducción volumétrica que experimenta un material al perder humedad interna. En reparaciones de concreto, este fenómeno es relevante porque diferencias significativas de retracción entre el sustrato y el material de reparación pueden inducir fisuras y pérdida de adherencia. Según ASTM C157, la retracción lineal no debe superar 0.04 % a los 28 días y 0.10 % al año, de manera que se garantice la compatibilidad dimensional y la durabilidad de la unión. Además, permite asegurar que el material reparador no genere tensiones internas excesivas al secar (ACI, 2010).

#### **1.3.2 Resistencia mecánica a compresión**

La resistencia a compresión mide la capacidad del material para soportar cargas axiales, siendo una de las propiedades mecánicas más importantes en el diseño y evaluación de reparaciones. Esta propiedad debe ajustarse a los requerimientos de servicio y a las condiciones de carga de la estructura. Se toma en cuenta porque garantiza que el material de reparación pueda cumplir la función estructural esperada. De acuerdo con EN 1504-3 (2006), los morteros de clase R3 deben alcanzar resistencias mínimas de 25 MPa, mientras que los de clase R4 deben superar los 45 MPa (EN 1504-3, 2006).

#### **1.3.3 Módulo de elasticidad (E)**

El módulo de elasticidad refleja la rigidez del material y su capacidad de deformarse frente a cargas. En reparaciones estructurales, se busca que este parámetro sea similar o ligeramente menor al del concreto del sustrato. Esto permite distribuir tensiones y disminuir el riesgo de grietas generadas por restricciones. Se contempla porque asegura que el mortero trabaje de manera conjunta con el sustrato y no produzca incompatibilidades mecánicas. La norma EN 1504-3 (2006) establece valores mínimos de 15 GPa para morteros de clase R3 y de 20 GPa para morteros de clase R4 (ACI, 2010; EN 1504-3, 2006).

#### **1.3.4 Adherencia**

La adherencia es la capacidad del material de reparación de mantenerse firmemente unido al sustrato. Una buena adherencia es esencial para la transferencia de esfuerzos y para evitar fallas por desprendimiento. Se considera porque garantiza la continuidad estructural de la reparación. Según EN 1504-3 (2006), la resistencia de adherencia medida por tracción

directa debe ser mayor o igual a 1.5 MPa para morteros R3 y 2.0 MPa para morteros R4. (EN 1504-3, 2006).

### **1.3.5 Fluencia (creep)**

La fluencia es la deformación lenta y progresiva de un material sometido a cargas constantes en el tiempo. En morteros de reparación, esta propiedad debe ser similar o menor a la del concreto base para prevenir deformaciones diferidas que afecten la compatibilidad y la distribución de esfuerzos. Se toma en cuenta porque una fluencia elevada podría comprometer la estabilidad de la unión a largo plazo. Según la literatura, un mortero de reparación no debe superar una deformación por fluencia de  $2.5 \times 10^{-6}$  /MPa a 90 días, similar a la de un concreto convencional (Czarnecki et al., 2020). Este valor se considera representativo según la compatibilidad descrita por Czarnecki et al. (2020) y los criterios establecidos en la norma EN 1504-3 (2006).

### **1.3.6 Permeabilidad / Absorción capilar**

La permeabilidad y la absorción capilar determinan la facilidad con que el agua y agentes agresivos penetran en el material. Un bajo nivel de absorción es fundamental para evitar el ingreso de cloruros, sulfatos y otros compuestos que deterioran la matriz del concreto y las armaduras. Se reconoce porque contribuye a la durabilidad y protección contra agentes externos. Las normas EN 1504-3 y EN 13057 recomiendan valores bajos como requisito de durabilidad (EN 1504-3, 2006).

### **1.3.7 Congelamiento y deshielo**

En regiones con ciclos de congelamiento y deshielo, la resistencia del material frente a estos procesos es crucial. El mortero debe mantener su adherencia al sustrato incluso tras múltiples ciclos de hielo-deshielo. Esta propiedad se toma en cuenta porque asegura el desempeño en climas extremos y evita el deterioro por variaciones volumétricas del agua congelada. EN 13687-1 establece que, después de 50 ciclos de hielo-deshielo, la adherencia residual debe ser  $\geq 1.5$  MPa para R3 y  $\geq 2.0$  MPa para R4, sin presencia de fisuras ni desprendimientos (EN 1504-3, 2006).

### **1.3.8 Resistencia química**

La exposición a ambientes agresivos con cloruros, sulfatos o ácidos débiles exige que el material de reparación posea resistencia química adecuada. Esta propiedad es importante en infraestructuras sometidas a ambientes marinos, industriales o de alcantarillado. Se considera porque asegura la vida útil de la reparación frente a agentes corrosivos. La norma EN 1504-2 recomienda seleccionar materiales en función de la clase de exposición (Czarnecki et al., 2020).

### **1.3.9 Resistencia a la carbonatación**

La carbonatación reduce el pH del concreto, desgastando la capa protectora de acero y favoreciendo la corrosión. Un material de reparación debe mostrar una resistencia elevada frente a este fenómeno, medida a través de la profundidad de carbonatación. Se toma en cuenta porque la protección de las armaduras frente a la corrosión es un requisito esencial en reparaciones. Normas como EN 1504-2 indican que la penetración debe ser menor a la de un concreto de control (EN 1504-3, 2006) y según EN 13892-4, la pérdida de espesor por abrasión en morteros de reparación debe ser  $\leq 20 \text{ mm}^3$  bajo ensayo Böhme.



## **Capítulo 2**

### **Metodología de investigación**

El presente capítulo aborda la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio sobre los geopolímeros reforzados con fibras como materiales de reparación. En él se explican los pasos seguidos para definir los principales aspectos que influyen en su comportamiento, tales como la resistencia, la durabilidad y el desempeño frente a distintos tipos de esfuerzos. También se detalla el proceso seguido para la búsqueda y selección de información, incluyendo los criterios aplicados y las bases de datos empleadas, con el fin de garantizar la obtención de fuentes confiables y actualizadas.

A través de esta metodología se busca establecer una guía clara y sistemática que oriente la revisión bibliográfica y permita analizar de manera ordenada los estudios más relevantes sobre el tema. Esto contribuirá a obtener una visión integral de cómo los geopolímeros reforzados con fibras pueden aplicarse eficazmente en tareas de reparación, así como a identificar los factores que determinan su desempeño y las oportunidades de mejora que presenta la investigación actual.

#### **2.1 Definición de los criterios de búsqueda**

El proceso de búsqueda bibliográfica se diseñó de forma sistemática con el fin de garantizar la pertinencia, actualidad y calidad científica de las fuentes analizadas. Se adoptó un enfoque metodológico estructurado en etapas, que abarca desde la identificación de términos clave hasta la aplicación de filtros de inclusión y exclusión.

##### **2.1.1 Definición de palabras clave**

Se emplearon términos relacionados con los ejes temáticos del estudio, tales como “geopolímeros”, “materiales de reparación”, “fibras de refuerzo”, “propiedades mecánicas”, “durabilidad”, “comportamiento microestructural” y “reparación estructural”. Estos conceptos fueron seleccionados por representar las variables centrales del análisis y se combinaron de distintas maneras durante la búsqueda para obtener resultados amplios y pertinentes. Además, se contemplaron sinónimos y términos equivalentes en inglés y español, con el fin de abarcar la mayor cantidad posible de investigaciones relevantes publicadas a nivel nacional e internacional.

##### **2.1.2 Temporalidad**

Se consideraron principalmente publicaciones realizadas entre los años 2010 y 2025, a fin de incluir estudios contemporáneos que reflejen el estado actual de la investigación sobre geopolímeros reforzados con fibras. No obstante, se incorporaron algunos trabajos previos cuando su aporte teórico o experimental resultó esencial para la comprensión de los mecanismos de refuerzo.

### **2.1.3 Tipo de documento**

Se priorizaron artículos científicos revisados por pares, tesis de maestría y doctorado, así como informes técnicos provenientes de instituciones académicas o de investigación reconocidas. Se excluyeron fuentes sin respaldo científico comprobable, como publicaciones no arbitradas o documentos con información comercial.

### **2.1.4 Idioma**

Se consideraron documentos redactados en inglés y español, para abarcar tanto la literatura internacional como los aportes de investigaciones regionales. Cabe recalcar, que la gran mayoría de los estudios identificados se encuentran publicados en idioma inglés, lo que evidencia la limitada disponibilidad de investigaciones en castellano sobre el tema. Esta situación representa una dificultad adicional en el proceso de revisión, ya que exige la consulta de fuentes en un idioma extranjero y refleja la necesidad de mayor producción científica en español dentro de esta línea de investigación.

### **2.1.5 Relevancia temática**

La selección de documentos se basó en su grado de relación directa con los objetivos centrales de la investigación, priorizando aquellos estudios que abordaran el comportamiento de los geopolímeros reforzados con fibras desde un enfoque estructural y de reparación. En particular, se dió preferencia a investigaciones que analicen la influencia del tipo, contenido y distribución de las fibras sobre las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, así como la durabilidad del material frente a agentes de deterioro físico, químico o ambiental.

También se consideraron trabajos que describen casos de aplicación práctica de geopolímeros en la rehabilitación o refuerzo de elementos constructivos, siempre que incluyeran una evaluación experimental o técnica verificable. En contraste, se excluyeron estudios centrados exclusivamente en la síntesis o caracterización química de geopolímeros sin aplicación estructural, o aquellos que no incorporaran ningún tipo de refuerzo fibroso.

Este criterio de selección permitió enfocar la revisión en fuentes con verdadero aporte técnico y científico, garantizando que la información analizada contribuya a comprender de manera integral las posibilidades, ventajas y limitaciones del uso de geopolímeros reforzados con fibras como materiales de reparación.

## **2.2 Estrategia de búsqueda y selección de fuentes de información**

La recopilación de información científica se llevó a cabo mediante la consulta de bases de datos académicas especializadas reconocidas por su amplitud temática, su constante actualización y su rigurosidad en los procesos de indexación. Entre las principales plataformas empleadas se incluyen ScienceDirect, Scopus, Google Académico, Elicit, Connected Papers y Dialnet.

Cada una de estas bases fue seleccionada por las ventajas que ofrece en la búsqueda de literatura científica y técnica relacionada con materiales de construcción y ciencia de los materiales:

- ScienceDirect y Scopus fueron utilizadas por su alto nivel de indexación y por concentrar artículos revisados por pares de alto impacto internacional.
- Google Académico permitió ampliar el alcance de la búsqueda e identificar documentos de libre acceso, tales como tesis y reportes técnicos.
- Elicit y Connected Papers se emplearon como herramientas complementarias para identificar conexiones temáticas, relaciones entre autores y evolución del conocimiento sobre geopolímeros reforzados con fibras.
- Dialnet facilitó el acceso a publicaciones en idioma español, principalmente procedentes del ámbito iberoamericano.

Asimismo, se realizó la consulta de repositorios académicos internacionales y en repositorios institucionales universitarios del Perú, donde se identificaron tesis y documentos técnicos relacionados con el empleo de materiales alternativos en la reparación estructural. La inclusión de esta fuente permitió incorporar investigaciones de contexto local, enriqueciendo la revisión con perspectivas regionales y experiencias aplicadas al entorno peruano.

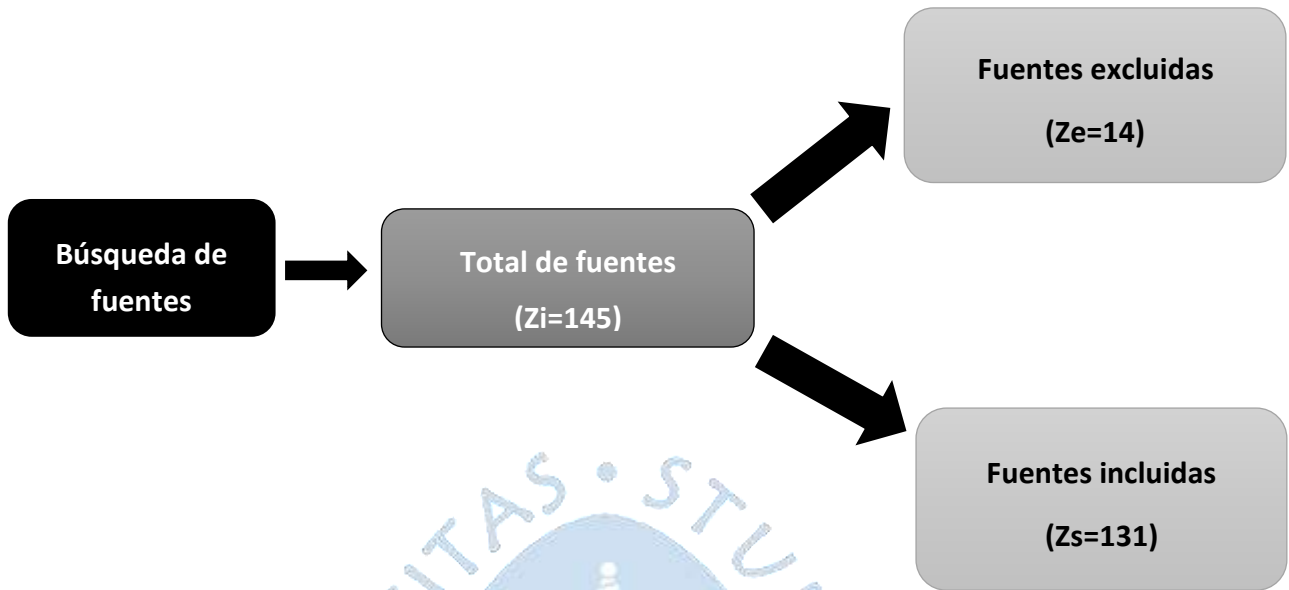
Además, se consultaron normas técnicas nacionales e internacionales relacionadas con la evaluación, diseño y aplicación de materiales cementicios y geopoliméricos. Entre ellas se consideraron los lineamientos establecidos por el *American Concrete Institute (ACI)*, *American Society for Testing and Materials (ASTM)* y el *International Concrete Repair Institute (ICRI)*. La inclusión de estas normas permitió establecer un marco técnico de referencia confiable, asegurando la coherencia entre los criterios experimentales reportados en la literatura y los estándares vigentes en la práctica profesional de la reparación estructural.

El uso combinado de bases de datos internacionales y repositorios institucionales aseguró una cobertura integral y equilibrada del campo de estudio, reduciendo sesgos por idioma o por procedencia geográfica de las fuentes. Además, se emplearon herramientas como Excel para organizar y clasificar los documentos, evitando duplicaciones y garantizando la trazabilidad de las referencias utilizadas.

En la Figura 6 se muestra el proceso empleado para la búsqueda, identificación y selección de las fuentes bibliográficas que conforman la base teórica de la investigación. En total, se registraron 145 artículos iniciales ( $Z_i=145$ ). Posteriormente, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, relacionados con la relevancia temática, la calidad metodológica, se excluyeron 14 artículos ( $Z_e=14$ ) que no cumplían con dichos parámetros. Finalmente, se seleccionaron 131 artículos ( $Z_s=131$ ) considerados adecuados y pertinentes para sustentar el marco teórico de esta investigación.

**Figura 6**

*Esquema de la búsqueda y selección de las fuentes bibliográficas*



### 2.3 Organización de los resultados

Dada la naturaleza compleja que implica el estudio del uso de fibras como refuerzo en matrices geopoliméricas y su potencial aplicación en la reparación de estructuras de concreto, se decidió organizar los resultados de esta investigación dentro de un único capítulo que integre de manera estructurada los hallazgos obtenidos. Esta organización responde al objetivo principal del estudio: analizar las propiedades y el comportamiento de los geopolímeros reforzados con fibras, considerando los factores que determinan su desempeño y durabilidad en sistemas de reparación estructural. Tal como señalan Pacheco Torgal & Jalali (2011), el refuerzo con fibras mejora de forma significativa la tenacidad, la resistencia post-fisuración y la adherencia en geopolímeros, lo que amplía sus posibilidades de uso en la rehabilitación de elementos de concreto. De igual forma, Lau & Cheung (2017) destacan que la respuesta del material depende tanto del tipo de fibra como de su interacción con la matriz, lo que requiere un análisis integral de sus propiedades físicas, químicas y microestructurales.

El Capítulo 3 desarrolla el análisis técnico de las propiedades más relevantes para la reparación estructural, a partir de una revisión exhaustiva de estudios experimentales. En este apartado se abordan los métodos de caracterización empleados, así como las principales propiedades mecánicas, de durabilidad y microestructurales: retracción por secado, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, adherencia, fluencia, permeabilidad, resistencia química, resistencia a la carbonatación y comportamiento frente a ciclos de congelamiento y deshielo. Además, se comparan resultados experimentales de distintas investigaciones, lo que permite identificar tendencias, discrepancias y avances en la

comprensión del desempeño de los geopolímeros reforzados con fibras frente a diferentes mecanismos de deterioro.

De esta manera, la estructura del capítulo permite cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, al compilar y analizar la información disponible sobre las fibras empleadas en matrices geopoliméricas, identificar los tipos más estudiados y sus propiedades clave para la reparación estructural, y examinar las aplicaciones documentadas que demuestran su desempeño frente a materiales convencionales. Con ello, se busca aportar una visión integral del potencial de los geopolímeros reforzados con fibras como alternativa técnica y sostenible para la rehabilitación de estructuras de concreto.



## **Capítulo 3**

### **Resultados**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la revisión de la literatura sobre las propiedades más relevantes de los geopolímeros reforzados con fibras aplicados en la reparación estructural. El análisis se desarrolla considerando la información recopilada en diversos estudios científicos, con el objetivo de identificar tendencias, coincidencias y diferencias en los hallazgos reportados. Se abordan las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la fluencia; las propiedades asociadas a la durabilidad, como la permeabilidad, la resistencia al congelamiento y deshielo, la resistencia química y la resistencia a la carbonatación y las propiedades microestructurales y de adherencia fibra-matriz, representadas por la retracción por secado, esenciales para comprender la interacción entre los componentes del material.

Asimismo, se analizan las aplicaciones en reparación estructural, destacando la adherencia del material al sustrato de concreto y su comparación con sistemas tradicionales de reparación. De esta manera, este capítulo busca consolidar el conocimiento existente y ofrecer un panorama claro sobre el potencial y las limitaciones de este material en aplicaciones de rehabilitación estructural.

#### **3.1 Propiedades físicas y mecánicas**

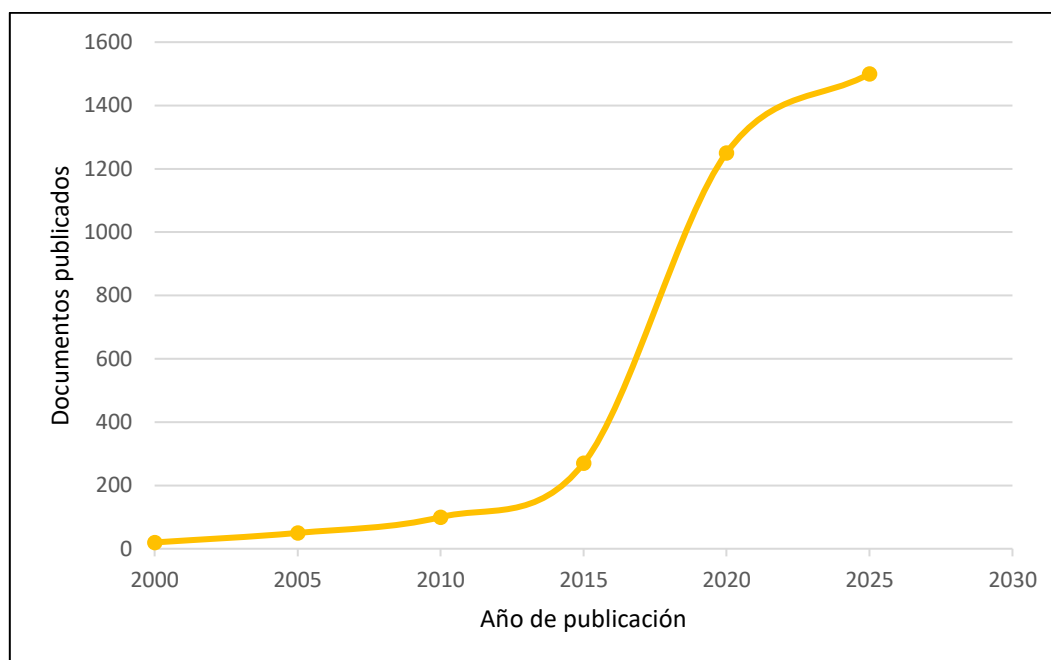
El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los geopolímeros ha cobrado especial interés en los últimos años debido a su potencial como materiales de construcción sostenibles y de alto desempeño. Los geopolímeros, obtenidos mediante la activación alcalina de materiales ricos en sílice y alúmina, presentan una estructura tridimensional Si-O-Al-O que les confiere elevada resistencia mecánica, aunque su comportamiento frágil ha impulsado el uso de refuerzos fibrosos para mejorar su desempeño estructural.

Según Abbas et al. (2022), antes del año 2010 la cantidad de investigaciones sobre el geopolímero era limitada; sin embargo, desde 2018 se observa un incremento sostenido en la cantidad de publicaciones científicas registradas en ScienceDirect, lo que evidencia un mayor interés internacional en el tema, como se ve en la Figura 7. Los resultados reportados por estos estudios confirman que la incorporación de fibras en la matriz geopolimérica contribuye a reducir la aparición y propagación de fisuras, además de mejorar la tenacidad, la resistencia a la flexión y la ductilidad del material, disminuyendo así su fragilidad característica.

Además, el incremento de la demanda del cemento Portland ha generado preocupación por su impacto ambiental, dado que la producción de una tonelada de cemento libera aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), representando entre el 5 % y el 7 % de las emisiones globales de este gas, debido a la calcinación del carbonato de calcio y al uso intensivo de combustibles fósiles (Wang et al., 2023).

**Figura 7**

*Cantidad de publicaciones sobre fibras incorporadas en concretos a base de geopolímeros en ScienceDirect*



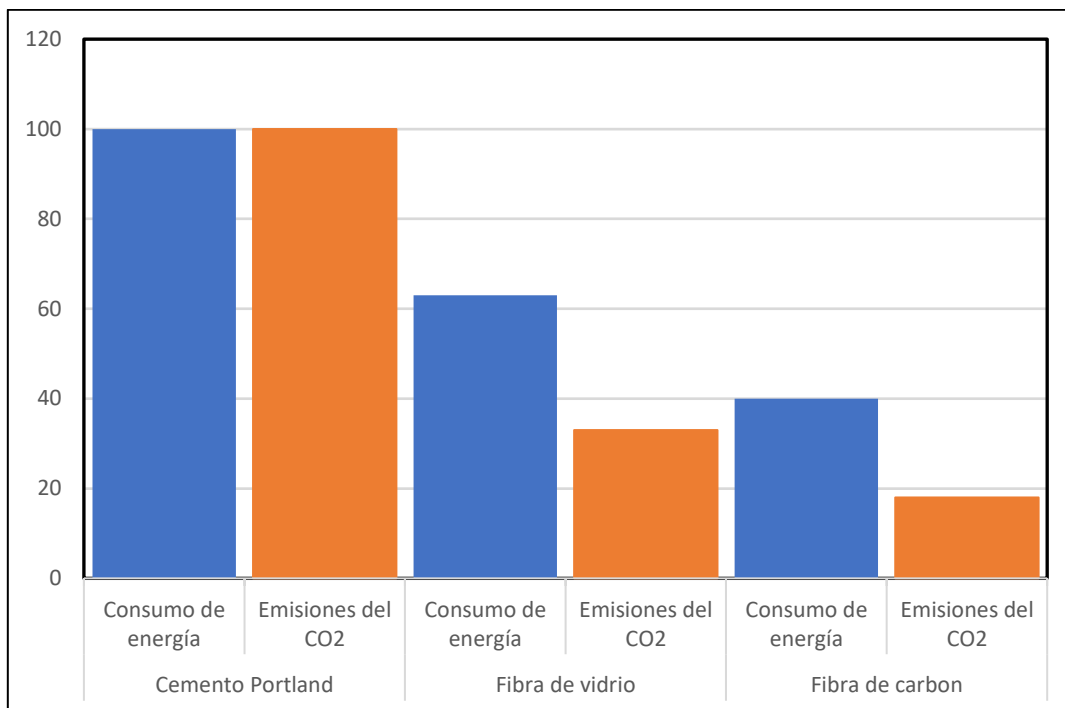
*Nota.* Elaboración propia a partir de Abbas et al. (2022).

En respuesta, el concreto geopolimérico se presenta como una alternativa sostenible basada en la reacción alcalina de materiales aluminosilicatos, como la ceniza volante, la escoria de alto horno o la ceniza de cáscara de arroz, con soluciones de hidróxidos o silicatos alcalinos, produciendo una matriz inorgánica de alta resistencia, durabilidad y estabilidad química (Aswani & Lathi, 2017). Este material permite reducir considerablemente la huella de carbono y aprovechar subproductos industriales, alineándose con las tendencias de construcción ecológica.

En el estudio de Wang et al. (2023) se muestra una comparación entre el cemento Portland y los geopolímeros respecto al consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados evidencian que la producción de concreto geopolimérico puede disminuir hasta en un 70 % el consumo energético y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 60 - 80 %, respecto al CP de igual resistencia, como se visualiza en la Figura 8. Esta diferencia se debe a que el geopolímero utiliza reacciones de activación alcalina a baja temperatura, mientras que el CP requiere procesos térmicos intensivos.

**Figura 8**

*Comparación del consumo de energía y emisión de CO<sub>2</sub> entre el cemento Portland y geopolímeros con fibras incorporadas*



*Nota.* Elaboración propia a partir de Wang et al. (2023).

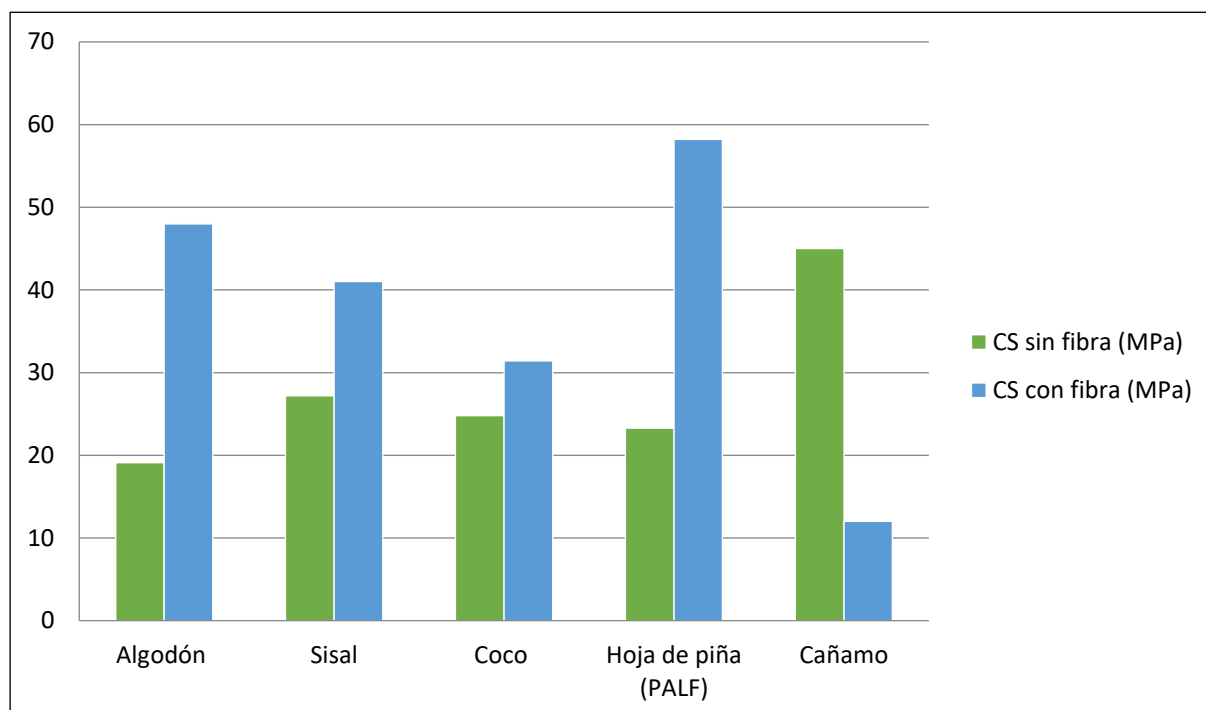
### **3.1.1 Resistencia a la compresión**

Según Korniejenko et al. (2020), la incorporación de fibras vegetales y animales permite mejorar la tenacidad, ductilidad y resistencia a la compresión de las matrices geopoliméricas, además de reducir la propagación de micro fisuras y el carácter frágil característico de estos materiales.

En la revisión realizada por Korniejenko et al. (2020), reportaron que pequeñas proporciones de fibras (entre 0.5 y 2 % en peso) generan incrementos significativos en la resistencia a la compresión, dependiendo de la longitud, tipo y tratamiento superficial de las fibras. Por ejemplo, en matrices a base de ceniza volante reforzadas con fibras de algodón al 0.5 % se registró un aumento del 151.3 % en la resistencia a la compresión, pasando de 19.1 MPa en el material base a 48.0 MPa en el compuesto, mientras que con 3 % de sisal alcanzó 41 MPa frente a 27.2 MPa (+50 %) del material base. En el caso de fibras de coco (1 % en peso), el incremento fue del 26.5 %, alcanzando valores de 31.4 MPa respecto a 24.8 MPa del control. Para la fibra obtenida de la hoja de piña, la incorporación del 1.2 % provocó un aumento en la resistencia, pasando de 23.3 MPa en la mezcla patrón a 58.2 MPa, equivalente a una mejora del 149 %. Sin embargo, el exceso de fibra o una longitud superior a 30 mm provocaron pérdidas de cohesión y disminución de la resistencia, como sucedió con el cáñamo, con 8 % tuvo una disminución en la resistencia a compresión, pasando de 45 MPa a 12 MPa, tal como se muestra en la Figura 9 (Korniejenko et al., 2020).

**Figura 9**

*Comparación de resistencia a compresión (MPa) sin y con fibra natural*



*Nota.* Elaboración propia a partir de Korniejenko et al. (2020).

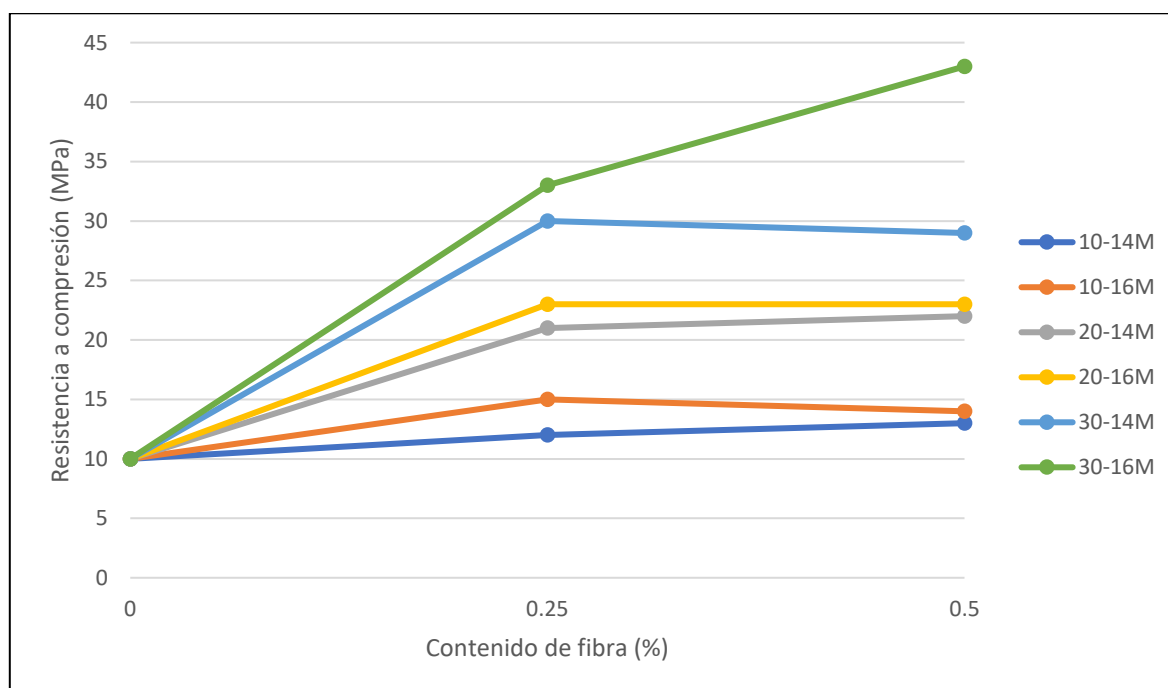
Asimismo, las investigaciones de Zulfiati et al. (2019) demostraron que la adición de fibras naturales de piña mejora sustancialmente la resistencia a la compresión en geopolímeros basados en ceniza volante. Evaluaron tres longitudes distintas de fibra de hoja de piña (10 mm, 20 mm y 30 mm) y dos concentraciones alcalinas de activador (14 M y 16 M de NaOH), con proporciones de fibra de 0,25 % y 0,5 % respecto a la masa de ceniza volante. Estas fueron sumergidas durante seis horas en la concentración alcalina, para eliminar lignina, ceras superficiales y mejorar la adherencia con la matriz. Los resultados mostraron que el uso de 0.5 % de fibras de piña de 30 mm de longitud en una mezcla activada con NaOH de 16 M alcanzó una resistencia a la compresión de 41.47 MPa, mientras que la pasta de geopolímero sin fibra solo obtuvo 11.70 MPa, representando un incremento de aproximadamente 254 % como se observa en la Figura 10. Además, la resistencia a flexión aumentó de 6.58 MPa a 9.20 MPa bajo las mismas condiciones experimentales, confirmando el efecto positivo del refuerzo natural. Cabe resaltar que los 30 mm representan una longitud límite eficaz; estudios anteriormente mencionados han mostrado que cuando se incrementa la longitud de las fibras o su contenido por encima de 0.5 %, la resistencia tiende a disminuir debido a la aglomeración de fibras, la presencia de vacíos y la pérdida de homogeneidad en la matriz (Korniejenko et al., 2020).

Por otro lado, el estudio de Al-Ghazali et al. (2022) analizaron el comportamiento de compuestos geopoliméricos reforzados con fibras vegetales locales en matrices de ceniza volante, evidenciando una mejora significativa en la resistencia mecánica cuando se optimiza

la proporción de fibras y la concentración del activador alcalino. En sus ensayos, los valores de resistencia a la compresión oscilaron entre 32 MPa y 45 MPa dependiendo del tipo de fibra utilizada y de su tratamiento. El tratamiento alcalino con hidróxido de sodio resultó esencial para eliminar impurezas, mejorar la rugosidad superficial y favorecer la interacción fibra-matriz, lo que incrementó la capacidad de transmisión de esfuerzos en la zona interfacial.

### Figura 10

*Impacto de la longitud y contenido de fibra en la resistencia a compresión de fibras naturales*



*Nota.* Elaboración propia a partir de Zulfiati et al. (2019).

Korniejenko et al. (2016) también destacaron que la adición de fibras naturales puede modificar de manera notable las propiedades estructurales del material. Las pruebas en el geopolímero a base de ceniza volante sin y con fibras de sisal (1 % en peso) mostraron un incremento del 1.5 % en la resistencia a la compresión (de 24.8 MPa a 25.2 MPa respectivamente).

Las fibras animales, como la lana, también se han probado en matrices de metacaolín. Korniejenko et al. (2020) reportaron que la incorporación de 5 % de lana tratada aumentó la resistencia a la compresión de 5.8 MPa a 9.1 MPa, una mejora del 56.9 %. De manera similar, la lana reciclada al 10 % elevó la resistencia a 8.6 MPa frente a 5.5 MPa, confirmando el potencial de este tipo de refuerzo para aplicaciones con propiedades térmicas y mecánicas balanceadas.

En general, los estudios coinciden en que la incorporación de fibras naturales, en cantidades controladas, mejora la resistencia a la compresión de los geopolímeros entre un 10 % y un 250 % dependiendo del tipo de fibra, longitud, porcentaje y tratamiento superficial.

Además, los tratamientos alcalinos o térmicos previos se consideran esenciales para optimizar la adherencia interfacial, evitar la absorción excesiva de agua y maximizar la transferencia de esfuerzos entre la matriz inorgánica y las fibras vegetales (Korniejenko et al., 2016; Korniejenko et al., 2020; Al-Ghazali et al., 2022; Zulfiati et al., 2019).

La revisión de Aswani & Lathi (2017) demuestra que los geopolímeros, aunque presentan ventajas frente al concreto Portland, exhiben una fragilidad similar bajo esfuerzos de tracción. Para contrarrestar ello, diversos estudios experimentales han evaluado la incorporación de fibras sintéticas, especialmente de PP, y las minerales, como el vidrio, con el fin de optimizar el comportamiento mecánico. En los ensayos revisados, la adición de fibras de polipropileno elevó la resistencia a compresión del concreto geopolimérico de 25.03 - 35.6 MPa (sin fibra) a valores de 26.43 - 38.72 MPa (con fibra), evidenciando mejoras moderadas pero consistentes según las condiciones de curado y el porcentaje de refuerzo (Eswaramoorthi & Arunkumar, 2014; Patil & Patil, 2015; Venugopal & Arthanareswaran, 2015). Por su parte, el uso de fibras de vidrio mostró incrementos de 24.26 – 38.28 MPa en mezclas sin refuerzo hasta 28.74 – 43.67 MPa en las mezclas reforzadas, destacando su eficacia para aumentar la densidad y cohesión de la matriz (Sathish Kumar et al., 2012; Vijai et al., 2012; Bhalchandra & Bhosle, 2013).

Estos resultados confirman que la adición de fibras en proporciones controladas, en particular un 0.03% en volumen de fibra de vidrio, mejora de manera significativa la resistencia a compresión del concreto geopolimérico. No obstante, el efecto del tipo de fibra no es lineal, ya que depende de su adherencia superficial, comportamiento químico y compatibilidad con la matriz alcalina (Aswani & Lathi, 2017).

Por otro lado, Wang et al. (2023) también analizaron la influencia de las fibras sintéticas y minerales sobre la resistencia a la compresión del concreto geopolimérico. En este grupo se incluyen fibras de PP, alcohol polivinílico (PVA), vidrio, acero y basalto. Los resultados mostraron que, aunque las fibras naturales ofrecen ventajas ambientales, las fibras sintéticas proporcionan mejoras más notables en la capacidad de carga del material. La adición de 1.2 % de fibras PVA incrementó la resistencia a la compresión en aproximadamente un 50 % en comparación con el geopolímero sin refuerzo, mientras que el uso de 1.5 % de fibras de polipropileno aumentó la resistencia de 32.05 MPa a 43.33 MPa. En el caso de las fibras de vidrio, el uso de 1.5 % de fibras de vidrio elevó la resistencia de 41.30 MPa a 50.85 MPa, equivalente a una mejora del 23 %. Estas variaciones se atribuyen a la mayor rigidez, estabilidad térmica y capacidad de transferencia de carga de las fibras sintéticas.

**Tabla 3**

*Valores reportados de resistencia a compresión en concretos geopoliméricos reforzados con fibra sintética y sin fibra*

<b>Autor(es) (Año)</b>	<b>Tipo de fibra</b>	<b>Resistencia sin fibra (MPa)</b>	<b>Resistencia con fibra (MPa)</b>	<b>Condición de curado</b>
Sathish Kumar et al. (2012)	Vidrio	28.74	24.26	Ambiente
Vijay et al. (2012)	Vidrio	35.88	38.72	Horneado 60 °C, 24 h
Balachandra & Bhosle (2013)	Vidrio	36.33	43.67	Curado 3 días
Eswaramoorthi & Arunkumar (2014)	Polipropileno	35.6	38.6	Horneado 60 °C, 24 h
Patil & Patil (2015)	Polipropileno	35.88	38.72	Ambiente
Venugopal & Arthanareswaran (2015)	Polipropileno	25.03	26.43	Horneado 60 °C, 24 h

*Nota.* Elaboración propia a partir de Aswani & Lathi (2017) y las investigaciones citadas.

Asimismo, los autores destacan que la geometría de las fibras de acero influye directamente en la respuesta del material. Las fibras corrugadas o con extremo en gancho mejoran el anclaje mecánico, controlan la apertura de grietas y aumentan la resistencia a la compresión relativa respecto a las fibras lisas.

Wang et al. (2023) también señalan que la combinación híbrida de fibras naturales y sintéticas representa una alternativa prometedora, ya que permite equilibrar sostenibilidad y desempeño mecánico. Al combinar fibras con distintos mecanismos de refuerzo, se obtienen materiales que presentan simultáneamente mayor resistencia a la compresión, mejor comportamiento a la flexión y una notable reducción de la fragilidad del concreto geopolimérico

Luego, según Wang et al. (2023) las fibras de carbono alcanzaron los valores más altos de resistencia a la compresión dentro del conjunto de materiales estudiados. Con una proporción del 1 %, los compuestos reforzados alcanzaron 95 MPa, lo que representa un incremento del 57.8 % respecto al control sin fibras. Además, estos compuestos conservaron más del 90 % de su resistencia después de ensayos de durabilidad acelerada, demostrando un excelente comportamiento frente a la humedad y las variaciones térmicas.

En síntesis, la evidencia experimental demuestra que tanto las fibras naturales como las sintéticas pueden optimizar la resistencia y ductilidad de los geopolímeros, siempre que se

controlen parámetros como la longitud, el contenido y el tratamiento de las fibras. Las fibras naturales aportan ventajas ecológicas y sostenibles, mientras que las sintéticas y minerales ofrecen mayor estabilidad y desempeño estructural. La combinación híbrida de ambas representa, por tanto, una estrategia prometedora para el desarrollo de materiales geopoliméricos más resistentes, durables y sostenibles.

### **3.1.2 Módulo de elasticidad (E)**

El módulo de Young o módulo de elasticidad (E) constituye una de las propiedades mecánicas más relevantes para caracterizar la rigidez de los geopolímeros, especialmente cuando se incorporan refuerzos fibrosos. Diversos estudios han evaluado cómo el tipo de fibra, su volumen, la matriz base (ceniza volante, escoria, metacaolín, etc) y las condiciones de curado influyen en la rigidez efectiva del compuesto. A continuación, se presenta un análisis comparativo de la literatura reciente, abordando los resultados de investigaciones con fibras naturales, sintéticas y minerales o inorgánicas, junto con una síntesis de valores típicos del módulo de Young.

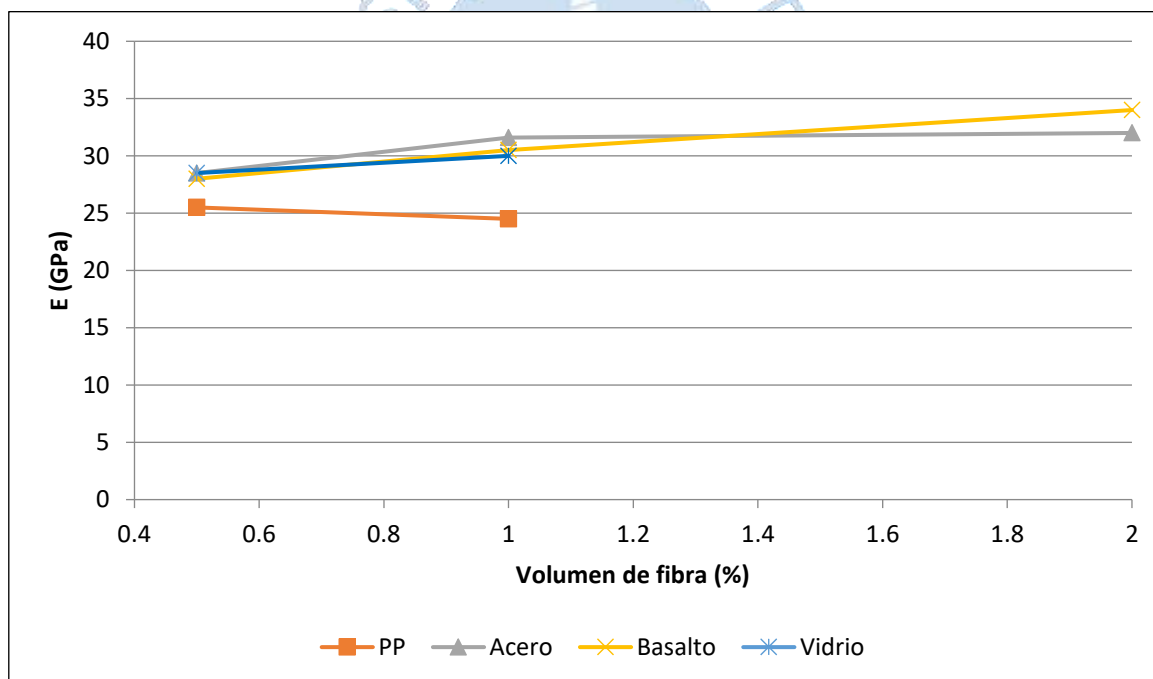
En el caso de las fibras naturales, como sisal, yute, lino o cáñamo, se ha observado un comportamiento mixto respecto al módulo de Young del compuesto. La rigidez depende de la fracción volumétrica de la fibra, su tratamiento superficial (alcalinización, silanización), la porosidad inducida y la adherencia fibra-matriz. Qu et al. (2024) señalan que los geopolímeros reforzados con sisal presentan módulos entre 16 y 25 GPa, con incrementos modestos asociados a una buena orientación y al tratamiento superficial de las fibras. Camargo et al. (2020) confirman que la incorporación de fibras naturales mejora la tenacidad y reduce la propagación de grietas, pero no siempre aumenta la rigidez, debido a la absorción de humedad y a la variabilidad morfológica de las fibras. De modo similar, Al-Ghazali et al. (2022) mencionan que la compatibilidad química entre la matriz alcalina y las fibras vegetales condiciona significativamente el valor final del módulo elástico.

Para las fibras sintéticas, como PP y PVA, el efecto sobre el módulo de Young se encuentra estrechamente vinculado al módulo intrínseco de la fibra, la cantidad incorporada y el efecto de porosidad. Pham et al. (2019) hallaron que la adición de fibras de PP al 0,5 % en volumen produce módulos de 25 - 26 GPa, mientras que con fibras de acero (1 %) se alcanzan hasta 31.6 GPa. En estudios con PVA, Deng et al. (2022) reportaron incrementos moderados en la rigidez (22 - 28 GPa) cuando se optimiza la adherencia, aunque con volúmenes altos puede reducirse E debido a microfisuración y mayor porosidad. Ranjbar & Zhang (2020) sostienen que las fibras sintéticas con alta rigidez intrínseca y buena adherencia tienden a conservar o mejorar E, mientras que las de baja rigidez lo reducen. Se destaca además que los geopolímeros con fibra incorporada pueden ofrecer rigideces comparables al concreto convencional, con valores de 24 - 30 GPa (Qu et al., 2024). En general, Yoosuk et al. (2024) observaron que en geopolímeros con fibras de PP, el módulo varía levemente según el ciclo húmedo-seco, pero se mantiene dentro del rango típico de materiales estructurales livianos.

En cuanto a las fibras minerales o inorgánicas, como basalto y vidrio, los resultados son más consistentes y tienden a mostrar aumentos claros en la rigidez del compuesto. Wang et al. (2022) registraron módulos de 28 - 34 GPa en concretos geopoliméricos con fibras de basalto, junto con mejoras en las propiedades de fractura. Furtos et al. (2024) confirmaron tendencias similares al usar fibras de basalto, logrando módulos superiores a 30 GPa en comparación con el control sin fibra. En el caso de las fibras de vidrio, se reportaron incrementos del módulo de elasticidad durante las primeras edades de curado, alcanzando valores de 27 - 32 GPa (Zhen et al., 2024), mientras que estudios previos señalaron que dosis excesivas pueden inducir porosidad y disminuir levemente la rigidez (Vijai et al., 2012). En conjunto, los resultados coinciden en que las fibras minerales, gracias a su mayor módulo intrínseco y estabilidad térmica, representan una de las estrategias más efectivas para mejorar la rigidez elástica de los geopolímeros.

**Figura 11**

*Comportamiento del módulo de elasticidad de cada fibra según el porcentaje de fibra*



La variación del módulo de Young en geopolímeros con fibras no es lineal con la dosificación de fibra. Factores clave son: (i) rigidez intrínseca de la fibra; (ii) fracción volumétrica y geometría; (iii) porosidad/trabajabilidad; (iv) curado y humedad; y (v) adherencia fibra–matriz. Como pauta, fibras de mayor módulo (basalto, vidrio; e incluso acero, cuando se usa) y una interfaz optimizada tienden a conservar o incrementar E, mientras que fibras de menor módulo (PP, PVA) pueden requerir dosificaciones bajas y tratamientos de superficie para evitar reducciones de E por aumento de vacíos o pérdida de rigidez efectiva del compuesto. Esto se observa en la Figura 11.

En la Tabla 4 se observa una recopilación de los valores, obtenidos de distintos artículos, del módulo de Young en geopolímeros con fibras y el volumen de esta misma.

**Tabla 4**

*Influencia del volumen de la fibra con distintas matrices de base en el módulo de Young*

Fibra	Matriz base	Volumen de fibra (%)	Módulo de Young (GPa)	Fuente
Sisal	Ceniza volante	1.0	16 - 25	Qu et al. (2024)
Yute / cáñamo	Metacaolín	0.5 - 1.0	18 - 26	Camargo et al. (2020)
PP	Ceniza volante	0.5	25 - 26	Pham et al. (2019)
Acero	Ceniza volante	1.0	31.6	Pham et al. (2019)
PVA	Metacaolín / escoria	1.0	22 - 28	Deng et al. (2022)
Basalto	Ceniza volante	1.0 - 2.0	28 - 34	Wang et al. (2022)
Vidrio	Escoria / FA	0.5 - 1.5	27 - 32	Zhen et al. (2024)

### 3.1.3 Retracción por secado

La retracción por secado en geopolímeros se ve fuertemente modificada por el tipo de fibra incorporada, su fracción volumétrica y la microestructura inducida en la matriz. En fibras naturales, la evidencia sugiere un comportamiento dependiente de la especie y del tratamiento superficial: en mezclas con fibras de sisal y otras fibras vegetales, se han medido reducciones de la retracción cuando la compatibilidad con la matriz es adecuada y se controla la porosidad, aunque algunos estudios advierten sobre la posible mineralización o contracción de la propia fibra bajo ambientes alcalinos que puede generar una falta de adherencia local si no se optimiza el curado (Batista dos Santos et al., 2021; Li et al., 2025). Para fibras de cáñamo en sistemas "one-part", se reportan reducciones de la retracción por secado frente a la matriz de referencia, atribuidas al puenteo de microgrietas y a la modificación de la red capilar (Bayraktar et al., 2023). En conjunto, las revisiones recientes sobre fibras vegetales concluyen que, bajo idénticas condiciones de mezcla y curado, fibras como cáñamo, ramio o bambú tienden a disminuir la retracción, mientras que sisal, yute o coco pueden requerir tratamientos y dosificaciones más cuidadosas para obtener el mismo efecto (Z. Li et al., 2025).

En compuestos con fibras sintéticas, el polipropileno (PP) y el alcohol polivinílico (PVA) han mostrado reducciones consistentes de la retracción a bajos contenidos (0.1 - 0.5 % vol.)

al restringir deformaciones y redistribuir tensiones; el PVA adicionalmente mejora la rigidez y el control de fisuración (Deng et al., 2022), aunque, el beneficio depende de que no aumente significativamente la porosidad de la mezcla (Abdollahnejad et al., 2018; Ranjbar & Zhang, 2020). Adicionalmente, trabajos comparativos en sistemas activados alcalinamente con vidrio o nylon muestran que la incorporación de fibra reduce la absorción de agua y la retracción, especialmente bajo curado térmico (Yildirim et al., 2025).

En el caso de fibras minerales, los resultados indican reducciones claras y sostenidas de la retracción por secado cuando se emplea basalto y, en ciertos diseños, vidrio, tal como se ve en la Figura 12. En concretos geopoliméricos con fibra de basalto, se observan menores tasas de retracción respecto a las mezclas sin refuerzo y, en algunos casos, la optimización de longitudes o mezclas híbridas produce la retracción mínima del conjunto (Heweidak et al., 2023; Si et al., 2023). Estudios en matrices FA/ESC con fibra de vidrio, incluyendo reciclada, reportan descensos significativos en la retracción por secado, junto con ganancias en resistencia a flexión, cuando se controla la trabajabilidad y el contenido de polvo de vidrio (Abdollahnejad, et al., 2017).

A manera de resumen, las revisiones recientes enfatizan dos rutas complementarias para controlar la retracción: modificar la estructura porosa (capilaridad) de la matriz y usar fibras que actúen como retractores de deformación y microgrietas, optimizando la interfaz fibra-matriz para evitar porosidad añadida (Ranjbar & Zhang, 2020; Seyrek et al., 2024).

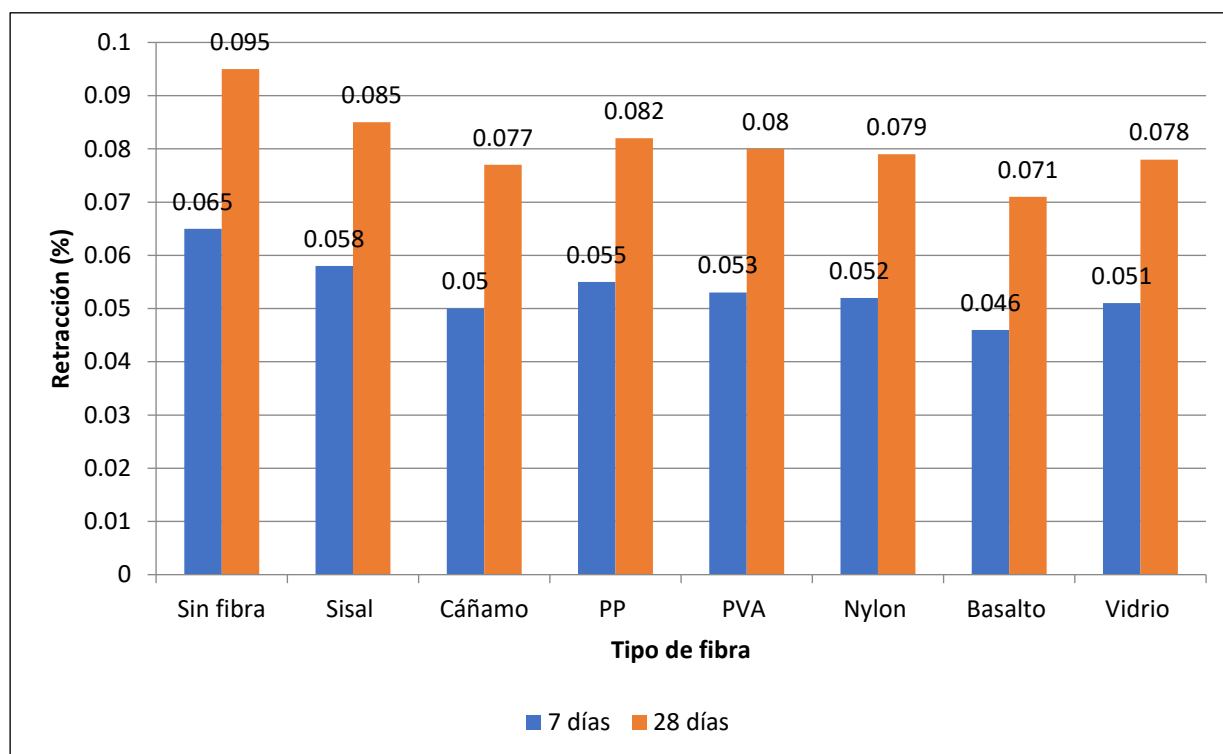
#### **3.1.4 Fluencia (creep)**

Así como la retracción por secado, la fluencia, es un fenómeno diferido que condiciona el desempeño estructural de los geopolímeros. En compuestos reforzados con fibras naturales, como sisal y cáñamo, la evidencia indica disminuciones de retracción y, en menor medida, de fluencia, siempre que se optimice el tratamiento superficial de la fibra y la compatibilidad con el medio alcalino, evitando la desadherencia o mineralización (Batista dos Santos et al., 2021; Bayraktar et al., 2023). En los sistemas *one-part*, el cáñamo muestra mejoras atribuibles a la modificación de la red capilar y al puenteo de microgrietas.

La fluencia (*creep*) en matrices geopoliméricas reforzadas con fibras constituye un parámetro crítico de serviciabilidad, pues controla la deformación dependiente del tiempo bajo cargas sostenidas y la acumulación plástica bajo cargas cíclicas. En compuestos a base de ceniza volante, la incorporación de fibras altera la microestructura (porosidad efectiva, microfisuración y rigidez de la interfase fibra-matriz), modificando la redistribución de tensiones y la cinética de deformación diferida (Gailitis et al., 2021, 2022, 2023).

**Figura 12**

Comparativa de retracción por secado a 7 y 28 días de geopolímeros con varios tipos de fibra y sin fibra



*Nota.* Elaboración propia con datos extraídos de Abdollahnejad, et al. (2017); Batista dos Santos et al. (2021); Bayraktar et al. (2023); Deng et al. (2022); Seyrek et al. (2024); Si et al. (2023); Yildirim et al. (2025); Zhang et al. (2025).

Como referencia de línea base, en geopolímeros de ceniza volante curados térmicamente sin fibras se han observado deformaciones por fluencia del orden de aproximadamente 100 micro deformaciones ( $\mu\epsilon$ ) después de un año, confirmando una tendencia de menor fluencia frente a concretos con cemento Portland ordinario bajo condiciones similares (Wallah & Rangan, 2006).

En un estudio de 67 días, con temperatura controlada de  $24 \pm 1$  °C y humedad relativa de  $30 \pm 3$  %, aplicando una carga equivalente al 20 % de la resistencia a compresión, se observó que la adición de 1 % de fibra de polipropileno (PPF) redujo las deformaciones de fluencia en 31 % frente al geopolímero sin fibra (Gailitis et al., 2021). Además, al analizar la fluencia neta (sin la contribución elástica), el índice relativo de *creep* con base en la mezcla de mejor desempeño (5 % PPF) fue de 1.40 para 1 % PPF, 1.99 para geopolímero sin fibra y 2.44 para 1 % de acero, lo que confirma que el mayor control de fluencia se alcanzó con la mezcla de 5 % PPF. No obstante, el aumento de la dosificación de fibra conllevó una reducción de la resistencia a compresión, que pasó de 52.5 MPa en el geopolímero sin fibra a 33.9 MPa en el compuesto con 5 % PPF, mostrando así el compromiso entre rigidez, porosidad y resistencia a corto plazo (Gailitis et al., 2021).

Bajo carga cíclica, donde interesa la acumulación de deformación plástica por ciclos, la inclusión de fibras también reduce significativamente la deformación. En compuestos a base de ceniza volante con refuerzo de baja dosificación, se registraron reducciones del pico de *creep* plástico de 37.19 % con 1 % de acero, 33.06 % con 0.5 % PVA y 24.40 % con 1 % PVA, evidenciando que la selección del tipo y contenido de fibra permite modular la susceptibilidad al *creep* plástico y la fatiga estructural (Gailitis et al., 2023). En estudios de deflexión a largo plazo realizados mediante ensayos de flexión en tres puntos, se verificó que el valor mínimo del “*specific creep*”, es decir, la menor deformación por fluencia experimentada por unidad de carga aplicada y por unidad de tiempo, correspondió al geopolímero reforzado con fibra de acero en una proporción del 1 %. En comparación, el geopolímero sin fibra presentó un incremento del 39.0 %, el compuesto híbrido con 0.5 % de PVA y 0.5 % de acero mostró un aumento del 43.6 %, y el material con 1 % de PVA alcanzó un incremento del 52.2 %. Estos resultados indican que la incorporación de fibra de acero mejora notablemente la resistencia del material a la deformación dependiente del tiempo, mientras que los aumentos observados se relacionan con la mayor porosidad y la menor rigidez interfacial asociadas a las fibras poliméricas (Gailitis et al., 2022). Así como los estudios mencionados anteriormente, también, se encontraron otros donde se fortalece la idea brindada en el párrafo, tal como se muestra en la Tabla 5.

Desde una perspectiva micromecánica, los resultados se explican por la interacción entre la rigidez de la fibra, la eficiencia del puenteo y la porosidad inducida por la mezcla. Fibras de alta rigidez, como el acero, limitan la micro fisuración y la deformación plástica cíclica, mientras que fibras de menor módulo, como PVA y PP, requieren dosificaciones moderadas para lograr beneficios. De manera general, puede concluirse que: en compresión sostenida, el PPF (1 - 5 %) reduce la fluencia hasta un 30 %; en carga cíclica, el acero (1 %) logra reducciones superiores al 37 %; el “*specific creep*” puede mantenerse dentro de rangos similares al material sin fibra si se controla la relación activador/sólidos y la adherencia interfacial; y los geopolímeros sin refuerzo (aproximado de 100  $\mu\epsilon$  /año) proporcionan una base cuantitativa útil para dimensionar las reducciones alcanzadas por cada sistema (Gailitis et al., 2021, 2022, 2023; Zhang et al., 2025; Wallah & Rangan, 2006).

**Tabla 5**

*Métricas de fluencia reportadas en distintos estudios en geopolímeros con fibras*

Tipo de fibra	Matriz base	% vol. fibra	Método de curado	Fluencia 90d ( $\mu\epsilon$ )	Fuente
Sin fibra	FA/ESC	0.0	Ambiente ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ; 50 - 60% HR)	320	Seyrek et al., 2024
Sisal	FA	0.8	Ambiente ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ; 50 - 60% HR)	300	dos Santos et al., 2021

Tipo de fibra	Matriz base	% vol. fibra	Método de curado	Fluencia 90d ( $\mu\text{E}$ )	Fuente
Cáñamo	One-part (FA)	0.6	Curado 60°C/24h + Ambiente	280	Bayraktar et al., 2023
PP	FA	0.3	Ambiente (20 $\pm$ 2°C; 50 - 60% HR)	295	Zhang et al., 2025
PVA	MK/ESC	0.5	Ambiente (20 $\pm$ 2°C; 50 - 60% HR)	290	Deng et al., 2022
Nylon	FA/ESC	0.5	Curado 60°C/24h + Ambiente	292	Yildirim & Akpınar, 2025
Basalto	FA	1.5	Ambiente (20 $\pm$ 2°C; 50 - 60% HR)	265	Si et al., 2023
Vidrio	FA/ESC	0.8	Curado 60°C/24h + Ambiente	275	Abdollahnejad et al., 2017

### 3.2 Propiedades de durabilidad

#### 3.2.1 Permeabilidad

El desempeño en durabilidad de los geopolímeros depende de los mecanismos de transporte de fluidos y iones a través de su red porosa conectada. Entre las variables más empleadas para cuantificar dicho transporte se encuentran el coeficiente de permeabilidad al agua, la absorción de agua, la sorptividad capilar y la penetración de cloruros medida por la carga transferida en el ensayo *Rapid Chlorure Permeability Test* (RCPT por sus siglas en inglés). A diferencia del cemento Portland, los geopolímeros bien diseñados suelen mostrar valores inferiores de permeabilidad; sin embargo, la incorporación de fibras puede modificar la conectividad de poros y la calidad de la interfaz, produciendo efectos que dependen del tipo de fibra, su dosificación, el método de activación y el curado.

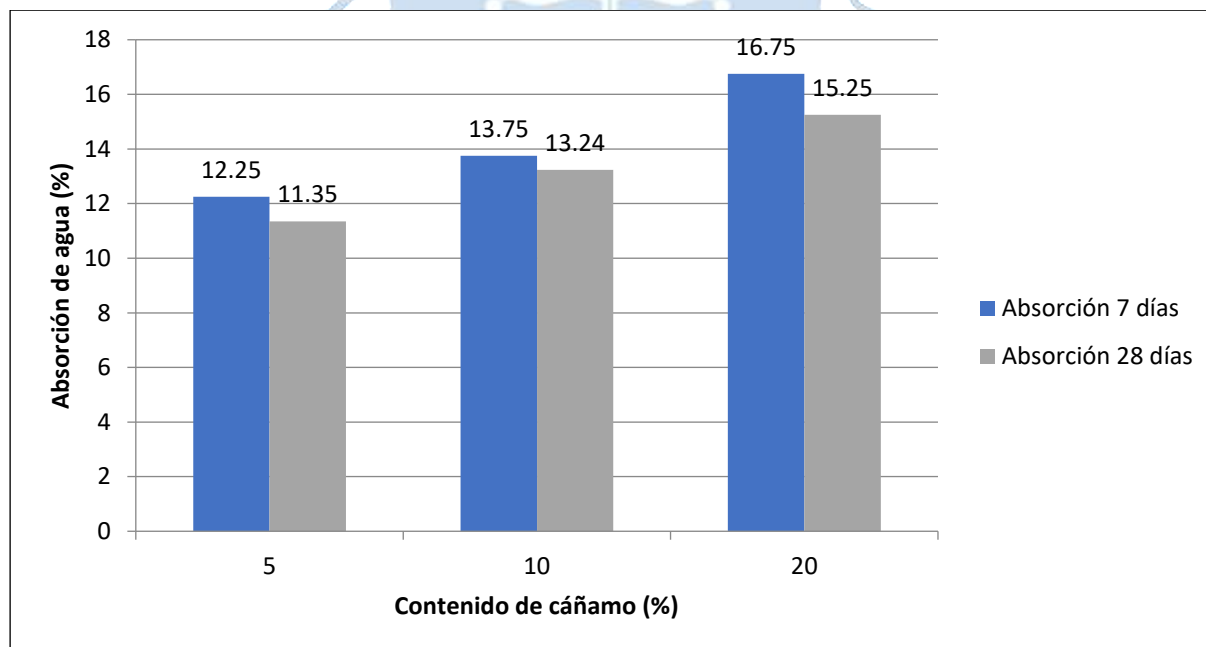
En compuestos geopolímeros con fibras naturales, el cáñamo muestra una influencia marcada en el transporte de agua. En un estudio con morteros geopoliméricos, la incorporación de 5, 10 y 20% de fibra de cáñamo elevó la absorción de agua a 12.25% y 11.35% (7 y 28 días) para 5%; 13.75% y 13.24% para 10%; y 16.75% y 15.25% para 20%, respectivamente, como se muestra en la Figura 13, con tendencia a la estabilización temporal conforme madura la microestructura. En el mismo trabajo, la penetración de cloruros por RCPT mostró 2130 Coulombs para el control y aumentos hasta 4175 C, 6500 C y 7950 C con 5 %, 10 % y 20 % de cáñamo, como se ve en la Figura 14; es decir, incrementos aproximados de 96 %, 205 % y 273 % respecto del control a 28 días (Filazi et al., 2025). Estos resultados sugieren que las fibras lignocelulósicas, si no se optimiza su tratamiento y dispersión, pueden aumentar la porosidad conectada y la longitud efectiva de trayectorias capilares.

En el grupo de fibras sintéticas, el PVA se ha empleado extensamente para micro refuerzo. En morteros geopoliméricos con PVA entre 0.15 % y 1.05 % en volumen se reportó un incremento de la sorptividad en el rango de 1.45 % a 15.16 % respecto del control, mientras que la resistencia a cloruros disminuyó entre 15.09 % y 56.35 %; aun así, la clasificación global se mantuvo en baja penetrabilidad (Deng et al., 2022). En cuanto al PP, se han documentado reducciones de RCPT en compuestos geopoliméricos reforzados, con cargas del orden de 821 - 815 Coulombs para mezclas optimizadas con PP a 28 días (Porpadham et al., 2025). Ello sugiere que las microfibras sintéticas, dosificadas y dispersadas adecuadamente, interrumpen la conectividad de poros y reducen la tortuosidad de trayectorias preferentes, con efectos favorables sobre la impermeabilidad efectiva.

En fibras minerales, la respuesta depende del tipo y de la compatibilidad con la matriz alcalinamente activada. Con fibras de basalto se describe con frecuencia una reducción de la sorptividad y de la absorción frente al control asociada al bloqueo tridimensional de vacíos y al puenteo de micro fisuras; sin embargo, la evidencia también reporta incrementos de absorción con fibra de vidrio en algunos diseños, mientras que pequeñas dosis de fibra de carbono pueden disminuirla. En todos los casos, la fracción volumétrica y la trabajabilidad del sistema condicionan el resultado (Guo et al., 2022).

**Figura 13**

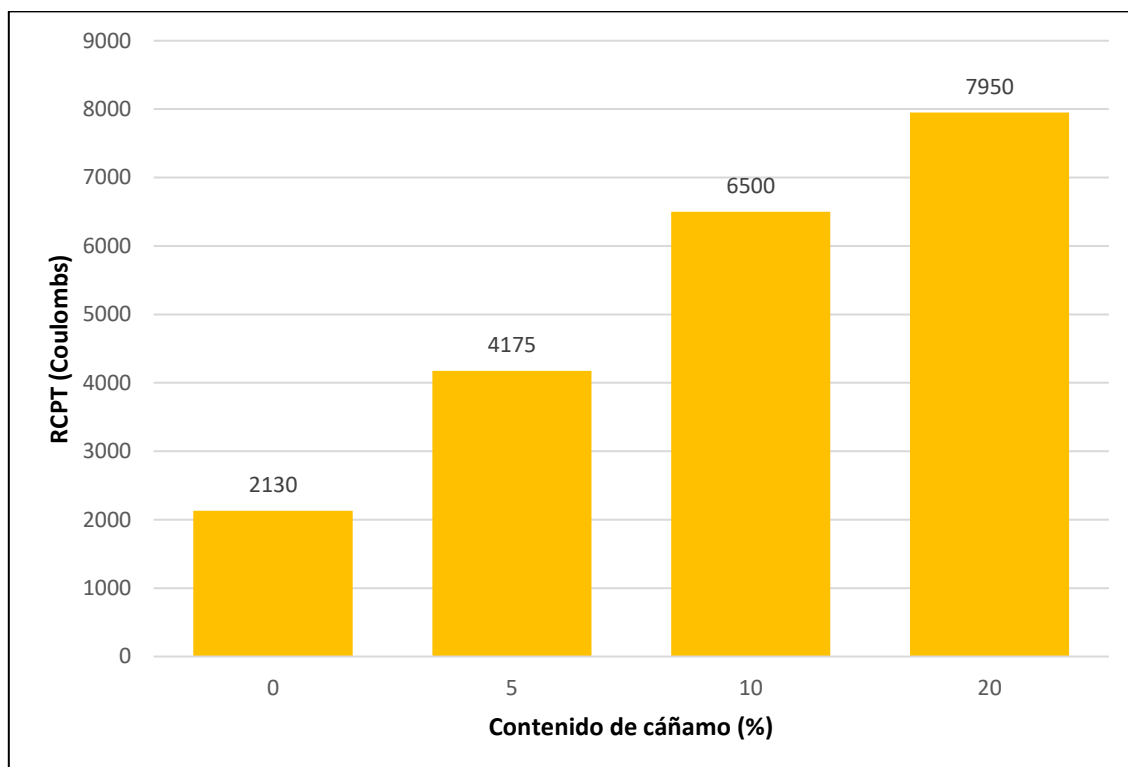
*Absorción de agua vs. contenido de cáñamo*



*Nota.* Elaboración propia con datos extraídos de Filazi et al. (2025).

**Figura 14**

*Resultados de un Ensayo Rápido de Permeabilidad a los Cloruros según el contenido de cáñamo*



*Nota.* Elaboración propia con datos extraídos de Filazi et al. (2025).

En síntesis, la permeabilidad en geopolímeros con fibras incorporadas responde a la interacción entre porosidad conectada, micro fisuración y calidad de la interfaz fibra-matriz. Los datos con cáñamo muestran aumentos claros de absorción y de RCPT con el contenido de fibra; el PVA introduce aumentos moderados de sorptividad sin comprometer severamente la clasificación por cloruros; y el PP puede reducir las cargas RCPT a niveles bajos. A partir de esta evidencia, la estrategia de diseño debería priorizar tratamientos superficiales en fibras naturales, dosificaciones óptimas que eviten redes de poros conectados, curados que favorezcan la densificación temprana y la evaluación conjunta de absorción, sorptividad y RCPT.

### **3.2.2 Congelamiento y deshielo**

Los geopolímeros reforzados con fibras presentan un comportamiento diferenciado frente a los ciclos de congelamiento y deshielo, una de las pruebas más exigentes de durabilidad para los materiales cementicios alternativos. Esta propiedad refleja la capacidad del material para resistir tensiones internas producidas por la expansión del agua congelada y la contracción al deshielarse, sin comprometer su integridad estructural ni sus propiedades mecánicas (Tan et al., 2021; Li et al., 2025). La interacción entre la matriz alcalina y las fibras, así como la porosidad, la densidad y la adherencia interfacial, determinan en gran medida el desempeño frente a este fenómeno.

En los geopolímeros con fibras naturales, la literatura destaca que una dosificación moderada mejora la resistencia frente al daño por congelamiento-deshielo, mientras que un exceso de refuerzo lignocelulósico incrementa la porosidad y la absorción capilar (Tan et al., 2021). Tan et al. (2021) determinaron que un contenido de 8 % de paja de arroz permitió mantener una pérdida de masa de 0.31 % tras 50 ciclos, mientras que una dosis superior al 12 % aumentó la pérdida a más de 0.82 %. Estos resultados evidencian que la optimización del contenido de fibra es esencial para controlar el ingreso de agua congelable y prevenir deterioros prematuros. En un estudio similar, Xuan et al. (2020) observaron variaciones de masa entre 0.1 % y 4 % después de 25 ciclos en compuestos de bagazo de caña, sin evidencias de daño macroscópico ni fisuras superficiales. De forma complementaria, Baris & Tanaçan (2023) reportaron que una mezcla con 1.5 % de fibra de banana presentó una ganancia de masa de 1.58 %, atribuida a una densificación interna de los productos de reacción, y mostró una resistencia aproximadamente 40 % mayor que el control. En una revisión más amplia, Li et al. (2025) concluyeron que los sistemas que incorporan fibras vegetales y ceniza volante logran retener entre el 85 % y el 90 % de su resistencia inicial después de 100 ciclos, gracias a la mejora de la interfaz fibra-matriz. En conjunto, estos estudios confirman que los refuerzos lignocelulósicos, dosificados entre 0.5 % y 8 %, permiten mantener la integridad estructural de los geopolímeros con pérdidas de masa bajas (menores al 1 %), siempre que se evite la saturación del sistema poroso.

En los geopolímeros reforzados con fibras sintéticas, la mejora de durabilidad es aún más pronunciada. Yuan et al. (2025) analizaron un concreto alcalinamente activado con alto contenido de ceniza volante y escoria (AAFSC) reforzado con 0.90 % de fibra de PP reportaron una pérdida de masa de solo 1.98 % tras 200 ciclos, también, la resistencia a compresión conservó el 57,9 % de su valor inicial después de 150 ciclos de congelamiento-descongelamiento, y aún mantenía un 38,3 % de resistencia residual tras 200 ciclos. En contraste, el material sin fibra perdió más del 5 % de masa a los 175 ciclos y mostró una caída del módulo dinámico relativo (RDME) desde 69 % (a 50 ciclos) hasta 39 % (a 100 ciclos), a comparación del AAFSC con fibra de PP que, al aumentar los ciclos de congelamiento y deshielo, la reducción del RDME fue mucho más lenta, incluso después de 175 ciclos, conservó más del 60 % de su valor inicial, evidenciando que las fibras de polipropileno mejoran notablemente su resistencia al deterioro por congelamiento y deshielo. Estos resultados demuestran que la adición de PP retrasa el deterioro y amplía la vida útil del material hasta unos 225 ciclos antes de alcanzar niveles críticos de daño.

Hossain & Sood (2023) obtuvieron resultados similares en compuestos alcalino-activados con fibras distintas, donde se registró un RDME superior al 90 % y una pérdida de masa inferior al 1.1 % luego de 300 ciclos, lo que evidencia una excelente estabilidad térmica y microestructural. Asimismo, Zhao et al. (2021) demostraron que los compuestos reforzados con fibra de alcohol polivinílico (PVA) mantuvieron una mayor integridad superficial bajo la exposición combinada a sulfatos y ciclos de congelamiento, reduciendo la degradación en

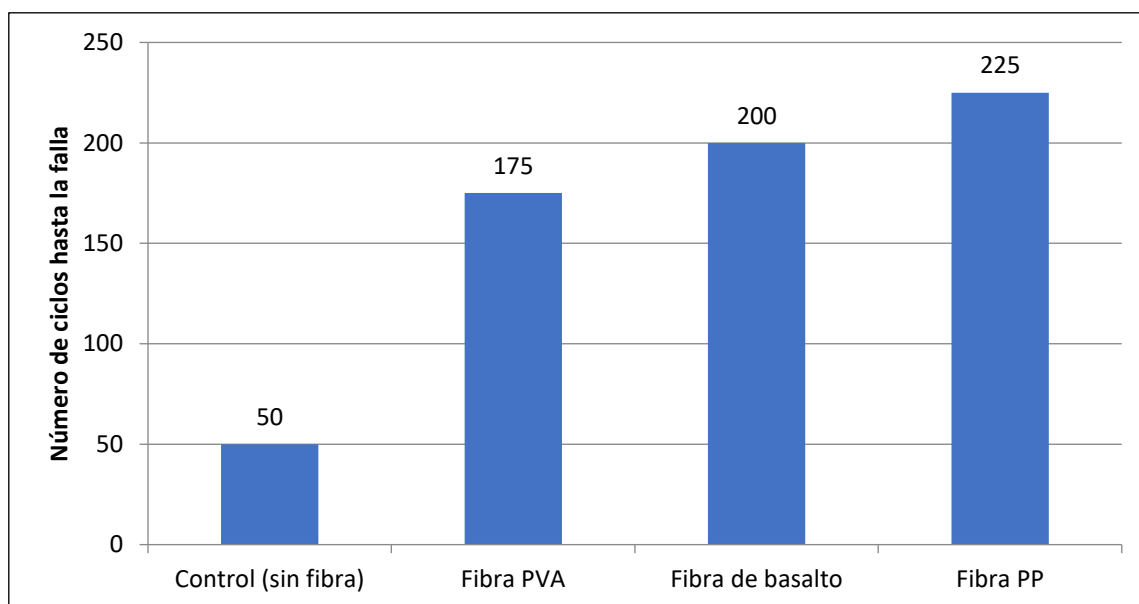
comparación con las matrices sin refuerzo. Estos hallazgos confirman que los geopolímeros con fibras sintéticas incorporadas, en especial los que incorporan PPF o PVA, pueden soportar entre tres y cuatro veces más ciclos antes del fallo en comparación con materiales sin refuerzo, además de reducir significativamente la pérdida de masa y la disminución del módulo dinámico.

En cuanto a las fibras minerales, los resultados son aún más sobresalientes. Bian et al. (2024) verificaron que un concreto geopolimérico reforzado con fibra de basalto soportó 200 ciclos de congelamiento y deshielo sin presentar daños estructurales importantes, lo que evidencia una alta durabilidad frente a condiciones de congelamiento y deshielo, con una pérdida de masa inferior al 1.5 %, incluso bajo condiciones de erosión por sulfatos. Este comportamiento se atribuye a la baja absorción de agua y a la alta estabilidad térmica del basalto, que permite mantener la resistencia estructural y evitar la propagación de micro fisuras. Los autores destacaron además que, al aumentar la dosificación de fibra, la capacidad del material para resistir ciclos repetidos se incrementa proporcionalmente, sin comprometer la adherencia interfacial (Bian et al., 2024).

El análisis comparativo de los datos recopilados permite establecer una jerarquía clara en la resistencia al congelamiento-deshielo: los compuestos con fibras minerales alcanzan el mayor desempeño (grado F200 o superior), tal como se muestra en Figura 15, seguidos por los geopolímeros reforzados con fibras sintéticas (RDME mayores o iguales a 90 %, pérdida de masa menores a 2 %), y finalmente los sistemas con fibras naturales, cuya efectividad depende de la proporción utilizada y del tratamiento superficial aplicado. De manera general, se observa que el uso combinado de fibras con adiciones puzolánicas finas, como ceniza volante o escoria, reduce la permeabilidad, mejora la adherencia fibra-matriz y estabiliza el módulo dinámico. En conjunto, los geopolímeros con fibra incorporada diseñados con criterios de optimización microestructural pueden alcanzar pérdidas de masa inferiores al 2 %, módulos dinámicos relativos superiores al 85 - 90 % y resistir entre 200 y 300 ciclos de congelamiento-deshielo, configurándose como materiales sostenibles y altamente durables frente a condiciones térmicas extremas.

**Figura 15**

*Durabilidad del geopolímero con fibra incorporada ante ciclos de congelamiento y descongelamiento reportada en diversos artículos*



En la Tabla 6, se observa una recopilación de datos encontrados en diversos artículos sobre la influencia de los geopolímeros con fibras incorporadas en el congelamiento-deshielo.

**Tabla 6**

*Métricas de congelamiento-deshielo reportadas en distintos estudios en geopolímeros con fibras*

Tipo de fibra	Dosificación	Ciclos	Métrica	Valor	Fuente	Nota
Paja de arroz	8 %	50	Pérdida de masa (%)	0.31	Tan et al. (2021)	Contenido óptimo; daño mínimo tras 50 ciclos
Paja de arroz	>12 %	50	Pérdida de masa (%)	0.82	Tan et al. (2021)	Exceso de fibra aumenta la pérdida de masa
Bagazo de caña	var.	25	Variación de masa (%)	4.0	Xuan et al. (2020)	Rango 0.1 - 4.0 %; sin daño macroscópico
Banana	1.5 %	-	Ganancia de masa (%)	1.58	Bariş & Tanaçan (2023)	Aprox. 40 % mayor resistencia vs. control
PPF	0.90 %	200	Pérdida de masa (%)	1.98	Yuan et al. (2025)	Retrasa degradación; vida

Tipo de fibra	Dosificación	Ciclos	Métrica	Valor	Fuente	Nota
						útil aprox. 225 ciclos
PPF	0.90 %	200	Resistencia residual (%)	38.3	Yuan et al. (2025)	Resistencia remanente tras 200 ciclos
PVA	2 %	300	RDME (%)	91.0	Hossain et al. (2023)	RDME > 90 % tras 300 ciclos
Basalto	var.	200	Grado de heladicidad (F)	200	Bian et al. (2024)	Cumple F200 con baja pérdida de masa

### 3.2.3 Resistencia química

La resistencia química de los geopolímeros con fibra incorporada constituye un criterio central para su empleo en infraestructuras expuestas a medios agresivos, tales como soluciones ácidas industriales, sulfatos, cloruros y ambientes marinos. En comparación con los cementos Portland ordinarios, las matrices geopoliméricas presentan menor contenido de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), una red aluminosilicática más estable y productos de reacción menos susceptibles a la lixiviación, lo que se traduce en menores pérdidas de masa y una mayor retención de resistencia mecánica frente al ataque químico (Mohamed & Zuaiter, 2024; Qin et al., 2023). Cuando se introducen fibras naturales, sintéticas o minerales, la respuesta química resulta del acoplamiento entre la durabilidad de la matriz geopolimérica y la estabilidad físico-química de las fibras, aspecto clave para el diseño de composites durables en ambientes severos (Farhan et al., 2022; G. Silva et al., 2020).

En sistemas reforzados con fibras naturales, los estudios recientes subrayan que la matriz geopolimérica puede proteger parcialmente a fibras como bambú, sisal o cáñamo frente a la alcalinidad y a ciertos medios salinos, siempre que se apliquen tratamientos superficiales y contenidos moderados de refuerzo (Camargo et al., 2020; G. Silva et al., 2020). Ensayos en soluciones sulfáticas y salinas muestran que los geopolímeros con fibras vegetales adecuadamente tratadas mantienen reducidas pérdidas de masa y retienen más del 75 - 85 % de la resistencia a compresión tras ciclos prolongados de exposición (Gholampour et al., 2022), aunque una dosificación excesiva o fibras sin tratamiento tienden a incrementar la porosidad accesible, facilitando la penetración de iones agresivos y acelerando la degradación localizada de las fibras (Camargo et al., 2020). Este comportamiento obliga a combinar estrategias de modificación superficial de la fibra, optimización de la relación solución activante/sólido y uso de rellenos minerales finos para minimizar la formación de vacíos y mantener una interfaz densa y químicamente estable (G. Silva et al., 2020).

En los geopolímeros reforzados con fibras sintéticas (principalmente PVA y polipropileno), la literatura reporta un desempeño particularmente favorable frente a soluciones ácidas y medios que inducen transporte de cloruros. El empleo de fibras PVA en matrices de ceniza volante o metacaolín activadas alcalinamente ha dado lugar a compuestos de endurecimiento por deformación con micro fisuración controlada, en los cuales la pérdida de masa en medios como  $H_2SO_4$  al 3 - 5 % y la reducción de resistencia a compresión tras 28 - 56 días permanecen contenidas, mientras que la capacidad post fisura sigue siendo significativa (Ohno, & Li, 2019). De modo similar, la combinación de polipropileno con adiciones puzolánicas finas reduce la permeabilidad efectiva y limita el daño por ataque ácido y la migración de cloruros; mezclas optimizadas con contenido simultáneo de bentonita, humo de sílice y fibras de polipropileno reportan pérdidas de masa del orden de 2 - 3 % en soluciones de  $H_2SO_4$  al 5 %, frente a valores superiores al 6 % en mezclas de referencia sin fibra, confirmando el rol de estas fibras como refuerzo químicamente inerte y eficaz en el control de la fisuración y del transporte de especies agresivas (Khan et al., 2025; Mohamed & Zuaiteer, 2024).

Para fibras minerales, como las de acero y basalto, la evidencia empírica es aún más consistente respecto a la mejora de la resistencia química global del sistema. En el caso de las fibras de acero, geopolímeros basados en ceniza volante o escoria granulada muestran menores pérdidas de masa y mayores resistencias residuales que el hormigón Portland cuando se exponen a soluciones de  $H_2SO_4$  y  $Na_2SO_4$ ; la incorporación de fracciones volumétricas de fibra (entre 0,5 y 1,0 %) conduce a una matriz más densa y con mejor micro confinamiento de fisuras, lo que se traduce en pérdidas de masa del orden de 5 - 6 % frente a valores cercanos al 30 % en concretos convencionales sometidos a las mismas condiciones de ataque ácido prolongado (Farhan et al., 2022; Ganesan et al., 2015). Estudios en geopolímeros reforzados con fibras de basalto señalan, por su parte, una retención de resistencia a compresión superior al 85 - 90 % tras ciclos combinados de congelamiento–descongelamiento y exposición a sulfatos, atribuida a la buena estabilidad química del basalto en medios alcalinos y sulfáticos, así como a su capacidad para puentear fisuras y limitar la coalescencia del daño en la matriz aluminosilicática (Bian et al., 2024).

La síntesis comparativa de estos resultados indica que la resistencia química de los geopolímeros con fibra incorporada depende de tres dimensiones de diseño: la estabilidad intrínseca de la fibra frente al medio agresivo, la cohesión y continuidad de la matriz geopolimérica, incluyendo su contenido de calcio y la relación Si/Al, y la calidad de la zona de transición interfacial (Qin et al., 2023; Mohamed et al., 2024), tal como se muestra en la Tabla 7. Las fibras naturales requieren mayor control del acondicionamiento superficial y de la porosidad para evitar que se conviertan en vías preferenciales de ingreso de agentes agresivos (Silva et al., 2019), mientras que las fibras sintéticas ofrecen una contribución robusta al control de fisuras sin comprometer la estabilidad química del sistema (Ohno, & Li, 2019). Las fibras minerales, en especial el acero adecuadamente protegido por la matriz y el basalto con

elevada resistencia a la corrosión, demuestran ser las más eficaces para mantener bajas pérdidas de masa y alta retención de resistencia en ambientes con sulfatos, cloruros y ácidos (Bian et al., 2024; Ganesan et al., 2015; Sukontasukkul et al., 2023).

**Tabla 7**

*Indicadores representativos de resistencia química en geopolímeros sin fibra y con fibra incorporada basándose en pérdida de masa o retención de resistencia*

Tipo de fibra	Referencia	Medio agresivo y tiempo de exposición	Indicador reportado	Valor (%)
Sin fibra	Silva et al., 2019	3 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 28 días	Pérdida de masa de la muestra	8,5
Sin fibra	Ganesan et al., 2015	2 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 90 días	Pérdida de masa en OPC (cemento Portland)	29,0
Sin fibra	Khan et al., 2025	5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 56 días	Pérdida de masa del control	6,8
Bambú	Silva et al., 2019	3 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 28 días	Pérdida de masa con 1 % de fibra	10,2
Cáñamo	Gholampour et al., 2022	5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 90 días	Retención de resistencia a compresión	82,0
PVA	Ohno & Li, 2019	3 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 56 días	Retención de resistencia a compresión (EGC)	90,0
Basalto	Bian et al., 2024	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + ciclos de congelamiento-deshielo, 120 días	Retención de resistencia a compresión (fibra óptima)	88,0
Acero	Ganesan et al., 2015	2 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 90 días	Pérdida de masa en GPC (geopolímero)	6,0
Acero	Ganesan et al., 2015	2 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 90 días	Pérdida de masa en SFRGPC (geopolímero con fibra de acero)	5,0

Tipo de fibra	Referencia	Medio agresivo y tiempo de exposición	Indicador reportado	Valor (%)
Acero	Farhan et al., 2022	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ / $\text{MgSO}_4$ , 180 días	Variación de masa SF-GPC ( $\pm$ )	1,5
Acero	Sukontasukkul et al., 2023	5 % $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 90 días	Retención de resistencia a compresión (SCF-GPC)	84,0

### 3.2.4 Resistencia a la carbonatación

La resistencia a la carbonatación en matrices geopoliméricas con fibra incorporada constituye un aspecto crítico para su aplicación estructural y de reparación en ambientes urbanos con exposición prolongada al dióxido de carbono. A diferencia de los cementos Portland, los geopolímeros presentan una química de geles distinta (principalmente N-A-S-H y/o C-(A)-S-H) que puede mostrar comportamientos favorables o vulnerables frente a la carbonatación dependiendo del tipo de precursor, el contenido de calcio, la porosidad y la presencia de fibras. La incorporación de fibras naturales, sintéticas y minerales no solo modifica la respuesta mecánica, sino también la microestructura y los caminos de transporte de  $\text{CO}_2$ , por lo que es necesario analizar de forma diferenciada su influencia sobre la profundidad de carbonatación, los coeficientes de difusión aparentes y la conservación de la resistencia mecánica.

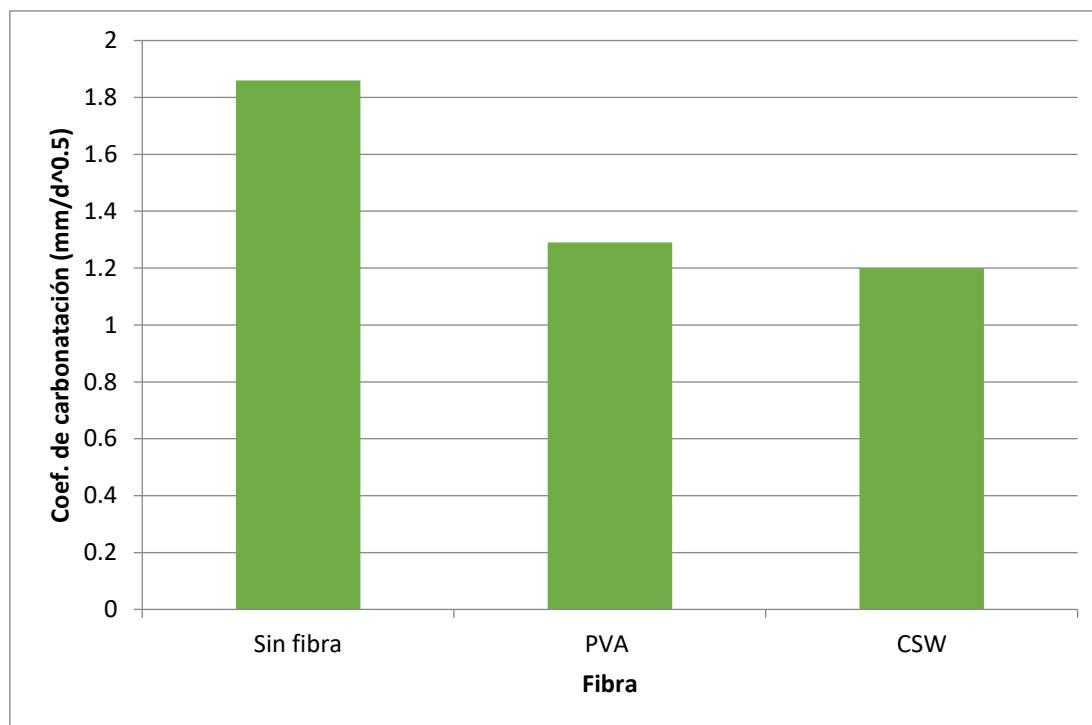
En el caso de los geopolímeros reforzados con fibras naturales, la evidencia experimental disponible aún es limitada, pero aporta resultados relevantes. Merta et al. (2022) evaluaron morteros alcalinamente activados a base de ceniza volante (FA1) y mezcla ceniza volante/escoria granulada (FA2S) reforzados con fibras de cáñamo (0.5 y 1.0 % en volumen), sometidos a carbonatación acelerada (1 % de  $\text{CO}_2$ ,  $60 \pm 10$  % HR,  $21 \pm 2$  °C durante 56 días). Tras la exposición, los morteros con cáñamo mostraron disminuciones de absorción de agua del orden de 17 - 20% y, en el caso de la matriz FA1, incrementos promedio de resistencia a compresión cercanos al 40 %, mientras que en FA2S las variaciones se mantuvieron dentro de  $\pm 10$  %, lo que indica que la carbonatación no generó pérdida significativa de capacidad portante en presencia de la fibra, sino incluso un ligero efecto de densificación asociado a la precipitación de carbonatos en poros accesibles (Merta et al., 2022). Este comportamiento sugiere que, cuando la matriz es suficientemente densa y el contenido de calcio está controlado, la combinación de geopolímero y fibra vegetal puede mantener o mejorar su desempeño frente a la carbonatación, siempre que se limite la dosificación de fibra y se garantice una adecuada impregnación y adherencia.

Otros estudios sobre geopolímeros con fibras naturales, como los morteros con fibras de sisal o coco en matrices de ceniza volante (Wongsa et al., 2020), muestran que el aumento de porosidad asociado a fibras vegetales mal dosificadas puede favorecer la penetración de  $\text{CO}_2$  si no se optimiza la relación activador/sólido y el empaquetamiento granular, reforzando la idea de que el efecto de las fibras naturales es dual: pueden contribuir a la disipación de energía y a la auto confinación, pero también introducir poros conectados si no se controla la interfaz. En síntesis, la literatura reciente apunta a que los geopolímeros reforzados con fibras naturales pueden alcanzar una resistencia a la carbonatación comparable o superior a los sistemas sin fibra siempre que la matriz sea de baja permeabilidad, el volumen de fibra sea moderado y se considere la durabilidad propia del refuerzo lignocelulósico.

En los geopolímeros con fibras sintéticas, en particular con fibras de PVA y PP, se dispone de resultados más sistemáticos respecto a la resistencia a la carbonatación. Li et al. (2022) estudiaron un geopolímero a base de ceniza volante modificado con fibras PVA combinadas con refuerzos a nano y microescala, determinando profundidades de carbonatación y coeficientes aparentes bajo exposición acelerada. En dicho trabajo se reporta que el coeficiente de carbonatación del geopolímero de referencia se sitúa alrededor de  $1.86 \text{ mm/d}^{0.5}$ , mientras que las mezclas modificadas con PVA y con fibras minerales tipo CSW (Alambre de acero de carbono por sus siglas en inglés) reducen este valor aproximado a 1.29 y  $1.20 \text{ mm/d}^{0.5}$ , respectivamente (Figura 16), es decir, una disminución cercana al 30 - 35 % atribuida a la refinación de la microestructura, a la redistribución de poros y al control de fisuras microestructurales por acción de las fibras (Li et al., 2022). Este resultado sugiere que, en matrices adecuadamente diseñadas, las fibras sintéticas no solo mejoran la resistencia a la carbonatación, sino que contribuyen a mejorarla al reducir la permeabilidad efectiva.

**Figura 16**

*Coefficientes de carbonatación vs tipo de fibra incorporado según estudio reportado*



En el caso de geopolímeros basados en escoria granulada de alto horno reforzados con microfibras de PP, se han reportado reducciones de la profundidad de carbonatación del orden de 10 - 30 % respecto al material sin fibras, asociadas al control de fisuración por retracción y al cierre parcial de poros conectados por productos de reacción adicionales y mejor empaquetamiento (Farhan et al., 2023). Bajo este enfoque, las fibras sintéticas actúan como elementos de puenteo que limitan la formación de micro fisuras continuas, reducen la difusión de CO<sub>2</sub> y permiten mantener la alcalinidad interna de la matriz geopolimérica, lo que resulta particularmente relevante cuando existen armaduras de acero embebidas.

La incorporación de fibras minerales o metálicas, como fibras de acero, basalto o vidrio, introduce otro escenario en la resistencia a la carbonatación de los geopolímeros. Luan et al. (2022) analizaron el comportamiento frente a la carbonatación de un hormigón geopolimérico con fibras de acero (*steel fiber reinforced geopolymer concrete, SFRGC*), evaluando profundidades de carbonatación y variación de resistencia a compresión bajo exposición acelerada. Los resultados indican que, para una matriz geopolimérica densa, las profundidades de carbonatación del SFRGC se mantienen bajas y comparables a las del geopolímero sin fibra, sin pérdidas significativas de resistencia, lo que confirma que la microestructura del gel alcalinamente activado controla el ingreso de CO<sub>2</sub> y que la presencia de fibras de acero no penaliza la durabilidad si se asegura un recubrimiento adecuado y una baja permeabilidad global.

Estudios recopilados en revisiones recientes sobre morteros geopoliméricos con fibras de basalto y vidrio indican tendencias similares: cuando la matriz presenta baja relación agua/activador equivalente, adecuada dosificación de alcalinos y baja porosidad capilar, las fibras inorgánicas contribuyen a mejorar la tenacidad y, en varios casos, a reducir o no incrementar los parámetros de carbonatación medidos en términos de profundidad o coeficiente aparente (Benfratello et al., 2025; Hajiabadi et al., 2023; Li et al., 2022). Sin embargo, en matrices con alto contenido de calcio o porosidad elevada, la carbonatación puede inducir cambios en los geles C-(A)-S-H o N-A-S-H/C-A-S-H y modificar la interfaz fibra-matriz, por lo que el beneficio depende fuertemente del diseño del sistema.

En síntesis, la evidencia disponible sobre la resistencia a la carbonatación en geopolímeros con fibra incorporada permite establecer varios criterios técnicos relevantes para el diseño de materiales durables. Primero, las fibras naturales, como el cáñamo, pueden coexistir con matrices geopoliméricas densas sin comprometer la resistencia a la carbonatación e incluso favoreciendo una ligera densificación post carbonatación, siempre que se limite su contenido volumétrico, se controle su tratamiento superficial y se utilicen formulaciones con bajo contenido de calcio libre y baja permeabilidad. Segundo, las fibras sintéticas (PVA, PP) muestran un potencial claro para mejorar la resistencia a la carbonatación al refinar la microestructura, controlar la fisuración y reducir los coeficientes o profundidades de carbonatación en el orden de 15 - 40 % respecto a geopolímeros sin fibras, lo que las posiciona como refuerzos estratégicos en elementos geopoliméricos armados o expuestos a ambientes urbanos agresivos. Tercero, las fibras minerales o metálicas, como el acero y el basalto, no parecen incrementar la vulnerabilidad a la carbonatación cuando se integran en matrices geopoliméricas bien diseñadas; en estos sistemas, la durabilidad depende más de la compactación del gel y de la protección frente a la penetración de CO<sub>2</sub> que del tipo de fibra en sí.

### **3.3 Propiedades microestructurales y adherencia fibra-matriz**

#### **3.3.1 Adherencia**

La eficacia de un compuesto de geopolímero depende intrínsecamente de la adhesión interfacial entre la fibra de refuerzo y la matriz, siendo esta interacción suficiente fundamental para la transmisión de tensiones y para asegurar un comportamiento efectivo posterior al agrietamiento (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020). La solidez de esta unión a nivel microestructural está determinada por tres factores clave: la naturaleza química, la rugosidad o morfología superficial y la dispersión o contenido de la fibra (Moujoud et al., 2023).

Las fibras naturales, como el bambú, el lino, el cáñamo o el yute, han sido investigadas para mejorar propiedades como la resistencia a la flexión. Sin embargo, la adherencia interfacial está intrínsecamente ligada a la superficie externa y la relación de aspecto de la fibra. Las fibras naturales, si no son tratadas, suelen tener una superficie lisa o corrugada que resulta en una unión débil (Moujoud et al., 2023). Según Ranjbar & Zhang (2020), los

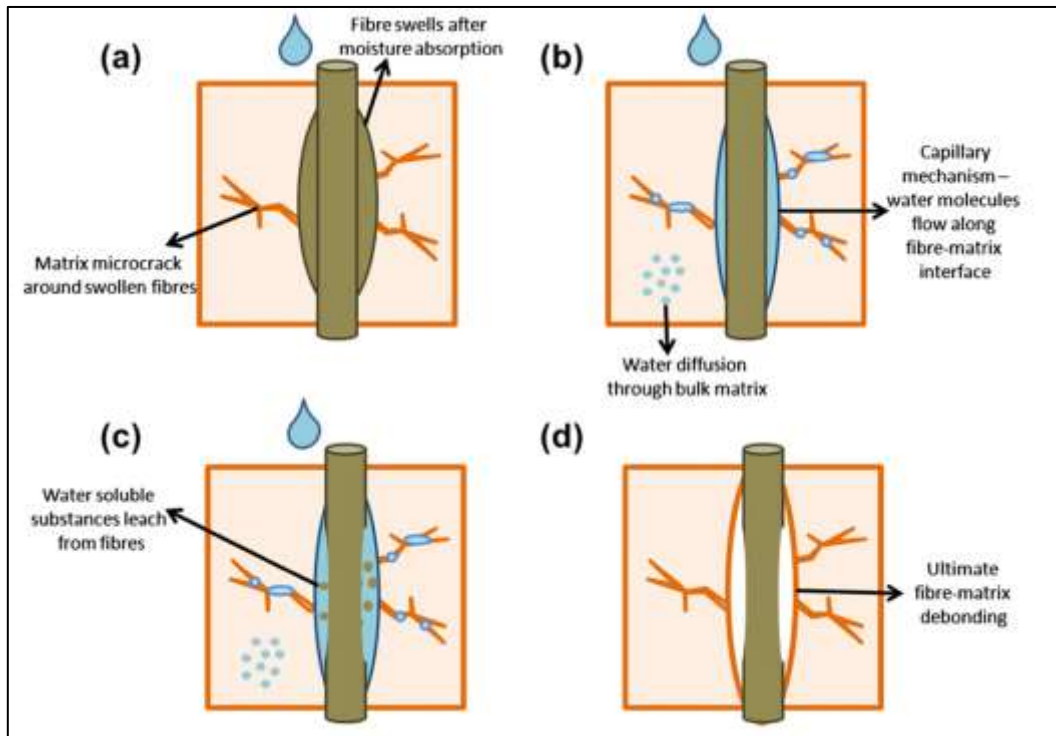
componentes como la lignina y la hemicelulosa en fibras sin tratar promueven una morfología porosa en la interfaz. Moujoud et al. (2023) dicen que el principal problema microestructural de las fibras celulósicas es que tienden a hincharse en presencia de agua y luego a encogerse al secarse la matriz, lo que conduce a la formación de huecos (“*gap*”) en la interfaz, causando desacoplamiento y la generación de áreas de vacío alrededor de la fibra. Un ejemplo de este efecto negativo, donde el agua atrapada resulta en la formación de vacíos, como se muestra en la Figura 17. Por el contrario, cuando se aplica un tratamiento alcalino, se eliminan estas sustancias indeseables, mejorando la adhesión y la interacción con el aglutinante, al aumentar la rugosidad superficial y facilitar un mejor agarre.

En el grupo de las fibras poliméricas sintéticas, la adhesión se complica para ciertos tipos. Las fibras hidrofóbicas como el polipropileno (PP), repelen el agua, lo que resulta en un contacto interfacial débil (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020). Según Ranjbar & Zhang (2020) este pobre contacto produce el desacoplamiento y la formación de burbujas de aire/vacíos, lo que reduce la transferencia de tensión. Este contacto débil, donde cada elemento actúa individualmente en lugar de en conjunto con la matriz, se ilustra en la Figura 18. Por el contrario, las fibras poliméricas hidrofílicas, como el alcohol polivinílico (PVA), logran una fuerte unión química debido a los grupos hidroxilo, aunque esta unión excesivamente fuerte puede causar la ruptura de la fibra en lugar del deslizamiento (*pull-out*) (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020).

En el caso de las fibras metálicas, como las de acero, exhiben una fuerte interacción por anclaje mecánico y fricción. El acero posee una superficie corrugada que, junto con su naturaleza hidrófila, facilita un contacto firme que se fortalece con el curado de la matriz, formando una fuerte región anular alrededor de la fibra (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020).

**Figura 17**

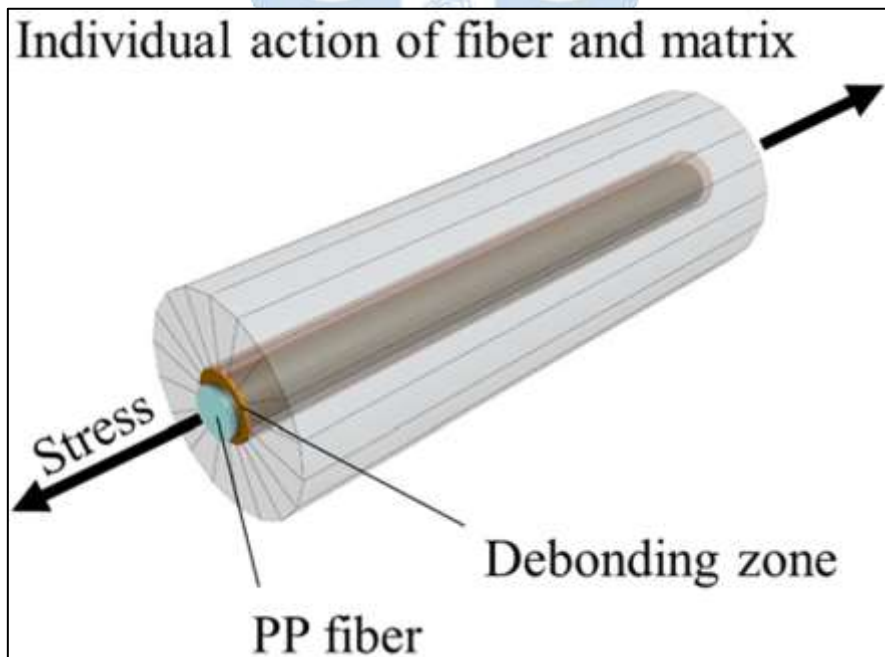
*Efecto del agua atrapada en la interfaz fibra natural-matriz geopolimérica*



*Nota.* Tomado de Azwa et al. (2013).

**Figura 18**

*Interacción débil de fibra-matriz*

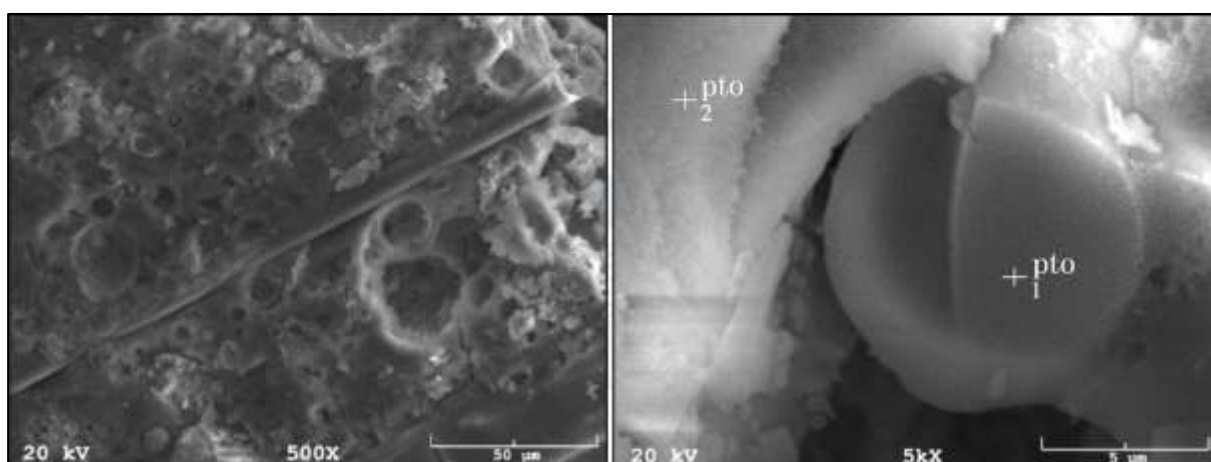


*Nota.* Tomado de Ranjbar & Zhang (2020).

Las fibras de carbono (FC) se distinguen por su excelente coherencia con la matriz de geopolímero. Los análisis microscópicos evidencian una falta de descohesión y muestran que la superficie de la fibra aparece cubierta por una fina capa de material de la matriz. Esta característica, que garantiza cohesión a altas temperaturas y muestra composiciones similares en los puntos evaluados (pto 1, pto 2), se observa en la Figura 19. El tratamiento de la superficie de las fibras, por ejemplo, con plasma, puede ser ventajoso al aumentar la rugosidad superficial y mejorar la adhesión. La capacidad de las fibras de carbono para trabajar contra la propagación de microgrietas gracias a los "bloques" de fibras es crucial (Růžek et al., 2023).

### Figura 19

*Microscopía de fibras de carbón en la matriz geopolimérica*



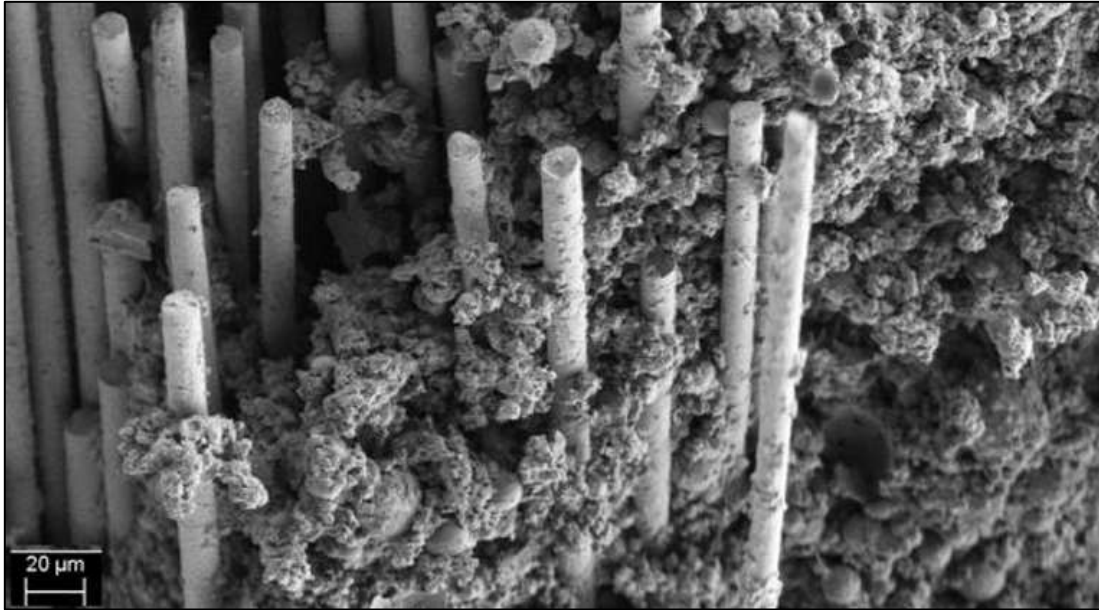
*Nota.* Tomado de Růžek et al. (2023).

Respecto a la fibra de vidrio, la adhesión es altamente sensible al contenido en peso. Con una proporción óptima (1 wt%), la fibra actúa como relleno para los poros, generando un compuesto denso y una adhesión fuerte. Esta microestructura compacta y homogénea permite una transferencia de tensión óptima a través de mecanismos de tenacidad como el puenteo de grietas y el deslizamiento de la fibra (*pull-out*). Un ejemplo de la estructura densa y la buena adhesión donde la fibra está fuertemente adherida a la matriz se observa en la Figura 20 (Yaakob et al., 2019). Un estudio experimental encontró que la fibra de vidrio a 2 mm de incrustación ofrecía la mayor eficiencia de adhesión en la prueba de extracción (58.86 N) de todos los materiales probados, lo que confirma su fuerte interacción interfacial (Nogueira et al., 2020).

No obstante, al superar el contenido óptimo de fibra de vidrio (2 wt%), se observa un efecto perjudicial. Esto resulta micro estructuralmente en una unión interfacial débil debido al efecto de aglomeración ("*ball together*"), que se manifiesta como fibras esparcidas y mal incrustadas. La aglomeración crea grandes huecos y lleva al desacoplamiento (*debonding*) y a la pérdida de resistencia. Este fenómeno de aglomeración y pérdida de adhesión, donde la fibra está suelta, es visible en la Figura 21 (Yaakob et al., 2019).

**Figura 20**

*Imagen SEM de la superficie de fractura del compuesto geopolimérico reforzado con fibra de vidrio al 1 wt%, 6 mm*



*Nota.* Tomado de Yaakob et al. (2019).

**Figura 21**

*Imagen SEM de la superficie de fractura del compuesto geopolimérico reforzado con fibra de vidrio al 2 wt%, 6 mm*



*Nota.* Tomado de Yaakob et al. (2019).

En conclusión, la adherencia de las fibras en matrices geopoliméricas depende principalmente de la interacción entre su química superficial, su morfología y su capacidad de

dispersión dentro de la pasta. Entre las fibras con mejor desempeño se encuentran las fibras de carbono, que presentan una excelente cohesión con el geopolímero, sin evidencias de descohesión y con un recubrimiento uniforme por parte de la matriz, lo que garantiza una adhesión estable incluso a altas temperaturas (Růžek et al., 2023). También destacan las fibras metálicas de acero, cuya superficie corrugada proporciona un anclaje mecánico eficiente y cuya naturaleza hidrófila favorece un contacto firme que se fortalece durante el curado (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020). Por su parte, la fibra de vidrio en contenidos óptimos, particularmente alrededor del 1 % en peso y con longitudes cortas de aproximadamente 2 mm, muestra una elevada eficiencia de adhesión, ya que se dispersa homogéneamente y actúa como un relleno de poros que facilita la transferencia de tensiones (Růžek et al., 2023).

En contraste, las fibras poliméricas hidrofóbicas, como las de polipropileno, presentan baja adherencia debido a su incapacidad para interactuar adecuadamente con la matriz acuosa del geopolímero, generando vacíos y un contacto interfacial deficiente (Moujoud et al., 2023; Ranjbar & Zhang, 2020). De manera similar, las fibras naturales sin tratamiento muestran un comportamiento poco favorable, ya que su superficie lisa proporciona un anclaje limitado y su tendencia a hincharse y contraerse durante el secado produce la formación de espacios permanentes entre la fibra y la matriz (Moujoud et al., 2023).

Un factor transversal que afecta negativamente la adherencia de prácticamente todos los tipos de fibras es el uso de contenidos excesivos, comúnmente superiores al 1 - 2 % en peso. Este exceso favorece la aglomeración, la formación de vacíos y una disminución sustancial de la calidad de la interfaz, lo que anula los beneficios del refuerzo y acelera la propagación de grietas. Asimismo, longitudes de incrustación mayores a la longitud crítica pueden generar fallas por entrelazamiento y reducir la efectividad del refuerzo debido a la disminución de la longitud útil de transferencia de carga (Yaakob et al., 2019).

### **3.4 Adherencia en concreto**

La evaluación de la interacción entre el geopolímero y el concreto, particularmente mediante ensayos de resistencia de unión por cizallamiento, es crucial para optimizar los materiales geopoliméricos en aplicaciones de reparación estructural (Osman & Irshidat, 2025). Los estudios revisados emplearon extensivamente el ensayo de corte inclinado (*Slant Shear Test*) y, en menor medida, la prueba de corte directo (*Direct Shear Test*) para cuantificar esta interacción interfacial.

Los precursores más comunes fueron la ceniza volante (FA) y la escoria de alto horno granulada molida (GGBS), o el metacaolín (MK) solo o en combinación con FA (MKFA). La escoria (GGBS) se caracteriza por su alto contenido de CaO (34 %) (Li et al., 2024; Ling et al., 2024), mientras que el MK y la FA se usaron con una baja cantidad de CaO (0.02% y 5.45% respectivamente), cabe destacar que el FA se divide en clase C y F, donde la C posee un alto contenido de CaO (>10%) y la F es todo lo contrario (<10%), en este caso se hizo uso de la

segunda clase mencionada, sin embargo, ambos precursores son ricos en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Arce et al., 2020). Los activadores alcalinos empleados consistieron en soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) combinadas con soluciones de silicato de sodio o potasio, que a veces se preparan disolviendo sílice fumada ( $\text{SiO}_2$ ) (Atan et al., 2022; Arce et al., 2020). La alta alcalinidad de estos ligantes es notable, con valores de pH que oscilan entre 13.1 y 14.7, superando el pH típico del concreto de cemento Portland (PCC), que va de entre 12 a 13 (Arce et al., 2020).

En cuanto al uso de fibras como refuerzo, cabe señalar que la mayoría de los estudios recientes, incluidos los de Atan et al. (2022), Mohsen et al. (2025) y Osman & Irshidat (2025), no incorporaron ningún tipo de fibra en sus mezclas geopoliméricas. Asimismo, al revisar la literatura relacionada con ensayos de “*shear bonding strength*” entre geopolímeros y concreto, se observa que los trabajos que sí emplean refuerzo fibroso son relativamente pocos. Los únicos identificados corresponden a investigaciones hechas por Arce et al. (2020) y Ling et al. (2024) donde las fibras utilizadas son exclusivamente sintéticas, como las de Alcohol Polivinílico (PVA), Polietileno (PE) o combinaciones híbridas PE-PVA. En cuanto a los ensayos de unión por cizallamiento, se llevaron a cabo evaluando la interfaz entre el geopolímero y el sustrato de concreto existente.

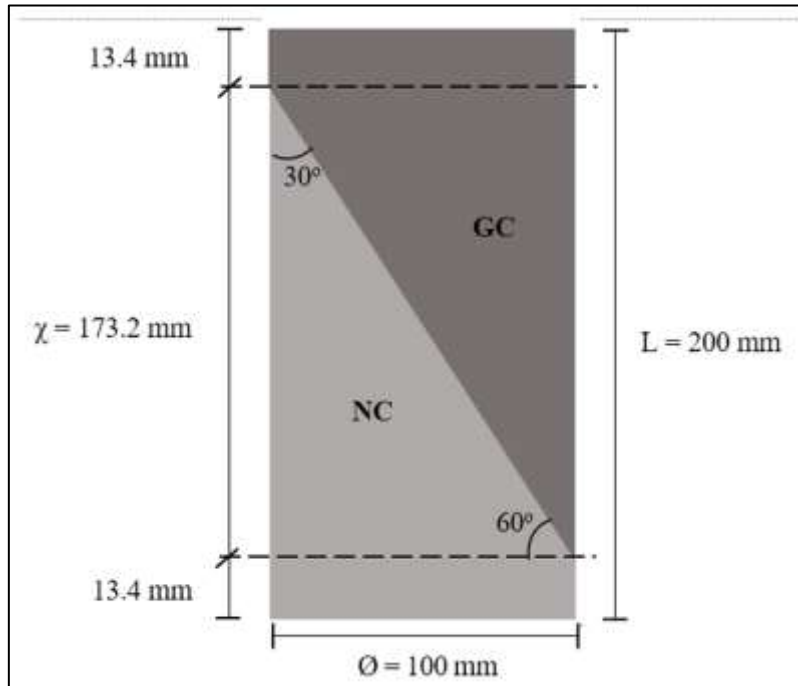
Atan et al. (2022) evaluaron la unión entre concreto geopolimérico (GC) de 80 MPa a 90 MPa y concreto normal (NC30) mediante la prueba de corte inclinado (*Slant Shear Test*) según BS631. Los especímenes cilíndricos tenían 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, con la interfaz inclinada a  $30^\circ$ , como se muestra en la Figura 22. La superficie del sustrato se mantuvo lisa, que era la condición de unión crítica evaluada. La máxima resistencia al corte puro ( $\tau$ ), obtenida según el criterio de Mohr-Coulomb, alcanzó un valor de 2.8 MPa en la mezcla NC30-GC80, presentándose una falla de tipo adhesiva, es decir, con separación ocurrida directamente en la interfaz.

En el estudio de Arce et al. (2020), el geopolímero a base de metacaolín reforzado con fibras PVA se sometió a la prueba de corte inclinado compresivo para evaluar este mismo al concreto de cemento Portland. Se prepararon composiciones de geopolímero etiquetadas como KXYZ o NaXYZ, donde la primera letra indica si contienen potasio (K) o sodio (Na), mientras que X, Y y Z son números que representan las relaciones molares de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , agua-sólidos (W/S) y  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , respectivamente. Quedó evidenciado que la adición de fibra de PVA produjo mejoras importantes en la resistencia a compresión, como también influyeron otros factores, tales como el tipo de arena utilizada (se usó arena de micro sílice “MS”, en vez de la arena de río) y la composición del ligante. La unión del compuesto K321 GP-MS-1.6%PVA, donde MS es la relación de arena/agente ligante (0.36 wt%), fue la que destacó, ya que la falla de los especímenes ocurrió consistentemente en el sustrato de concreto, lo que indica que la resistencia de la unión superó la resistencia del concreto mismo como se ve en la Figura 23.

Es importante señalar que la resistencia a compresión del espécimen de *slant shear* fue mayor que la resistencia a compresión a 28 días del concreto PCC (de 29.49 MPa aumentó a 36.74 MPa).

**Figura 22**

*Esquema del espécimen cilíndrico de corte inclinado, que muestra la interfaz inclinada a 30° del GC al NC*



*Nota.* Tomado de Atan et al. (2022).

**Figura 23**

*Imagen del espécimen antes y después de la falla en el sustrato de concreto*

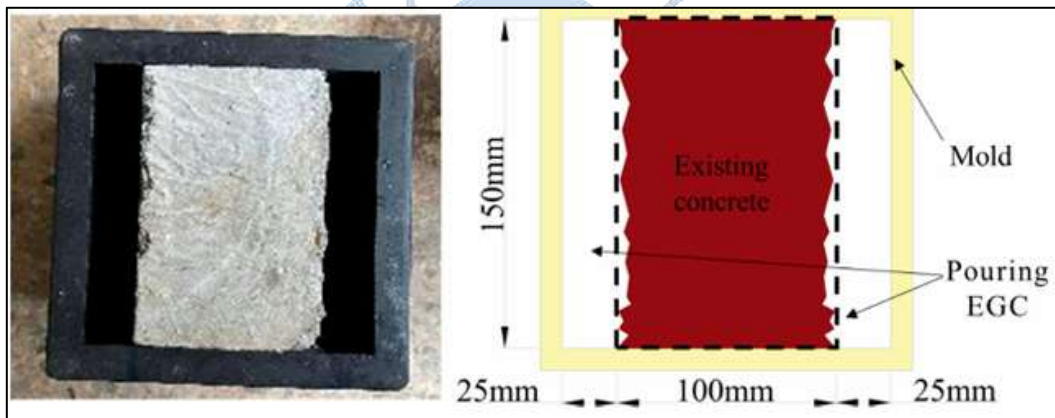


*Nota.* Tomado de Arce et al. (2020).

Li et al. (2024) examinaron la unión entre geopolímero (reforzado con fibras PE) y concreto existente (C30, C50, C70) mediante la prueba de corte directo en especímenes cúbicos de doble lado unido, lo cual se puede apreciar en la Figura 24 y la Figura 25. La preparación de la superficie fue clave, utilizando martillos neumáticos para generar tres rugosidades: Tipo I (0.15 mm, sin retirar la lechada), Tipo II (1.15 mm, retirando la lechada) y Tipo III (2.15 mm, rugosidad profunda). La resistencia de unión más alta fue de 3.29 MPa (para C70-III-G95). El modo de falla principal fue adhesivo (interfacial), pero el espécimen C30-III-G95 exhibió falla cohesiva por corte del concreto existente. Un aumento en la rugosidad, la resistencia del geopolímero y la resistencia del concreto existente afectaron positivamente la resistencia de unión. Se pueden apreciar los modos de falla de las probetas mencionadas a corte directo en la Figura 26.

**Figura 24**

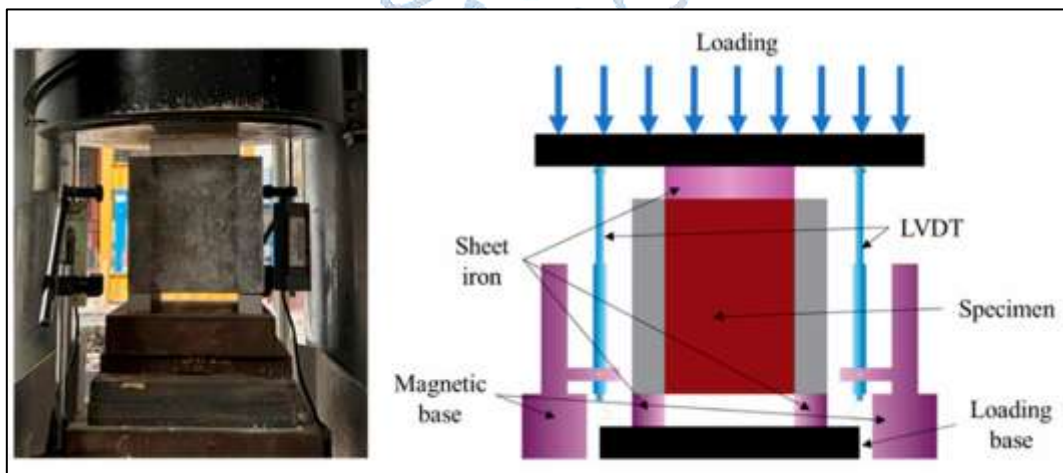
*Molde para las probetas de unión entre el geopolímero y el concreto existente*



*Nota.* Tomado de Li et al. (2024).

**Figura 25**

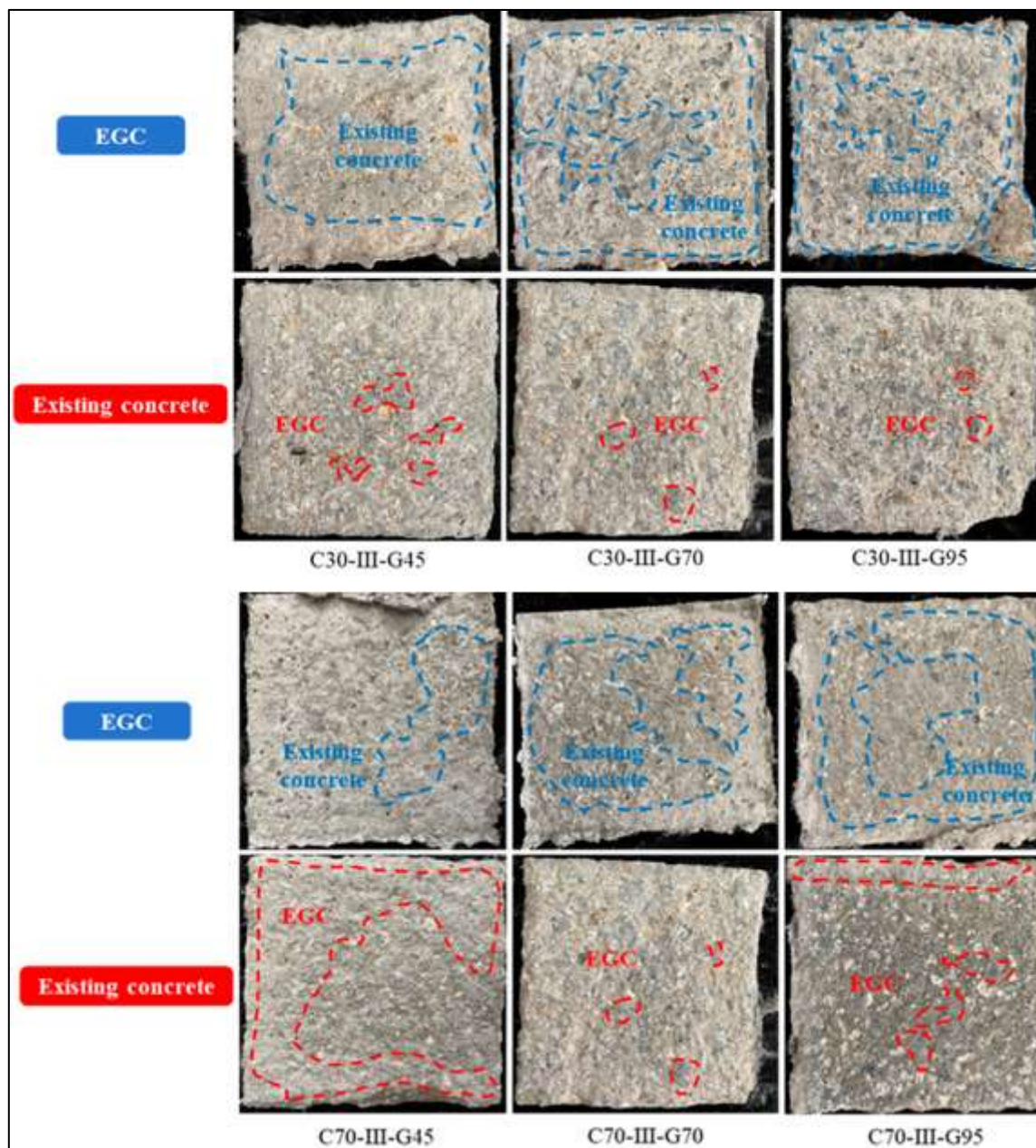
*Montaje de la prueba de corte directo en especímenes cúbicos de doble lado unido*



*Nota.* Tomado de Li et al. (2024).

Figura 26

Modos de falla de los especímenes de corte directo



Nota. Tomado de Li et al. (2024).

Ling et al. (2024) estudiaron la interfaz entre el geopolímero reforzado con fibras híbridas PE/PVA sin aceite y concreto (C30, C50, C70) mediante la prueba de corte inclinado compresivo, teniendo en cuenta que la superficie del sustrato de concreto fue lisa. La resistencia máxima al corte ( $\tau_n$ ) varió de 15.5 MPa a 26.1 MPa. El estudio encontró que el aumento en el contenido de GGBS (reducción de la *ratio* FA/GGBS a 5:5) mejoró la resistencia, y que el reemplazo de fibras PE por PVA sin aceite, con una relación PE/PVA de 1.0, aumentó ligeramente la resistencia a la tracción directa en 8.5%. El modo de falla se caracterizó por fracturas en el sustrato de concreto (falla cohesiva).

Osman & Irshidat (2025) utilizaron la prueba de corte inclinado para probar la unión de un geopolímero de FA/GGBS a sustratos de concreto de resistencia moderada (21 MPa) y alta (48 MPa). Se evaluaron superficies normales, cepilladas con alambre y con agregado grueso expuesto. La resistencia de unión máxima fue de 12.0 MPa (para agregado expuesto, sin agente de unión). El uso de agente de unión acrílico (Cempatch AB) degradó drásticamente la resistencia de unión, llegando hasta el 94 % en la superficie normal. La exposición del agregado grueso mejoró la resistencia de unión en un 29 %, y el uso de concreto de alta resistencia la mejoró en un 17 %. Los modos de falla en superficies con agregado expuesto incluyeron falla compresiva del geopolímero/sustrato, mientras que las superficies tratadas con agente de unión mostraron despegue en la interfaz.

En la Figura 27 se muestran imágenes comparando la resistencia al cizallamiento (*Shear Stress*) en diferentes días, bajo diferentes tratamientos superficiales, ilustrando el impacto negativo del agente de unión, donde las letras (N), (W) y (E) representan distintos tipos de superficie del concreto: normal o sin preparación, cepillada con alambre y con árido expuesto. Asimismo, (M) y (H) describen el nivel de resistencia del concreto base, indicando resistencia moderada y alta, respectivamente. Cuando se utiliza un agente de unión en el sustrato, se señala con la letra (Y), mientras que (X) especifica que dicho agente no fue aplicado, esto se ve en la Figura 28 y Figura 29. Finalmente, Mohsen et al. (2025) evaluaron dos mezclas de geopolímero: SGC (100 % Escoria) y FSGC (70 % Escoria + 30 % FA) con la prueba de corte inclinado y la prueba de extracción (*Pull-off Test*). Se usaron dos técnicas de rugosidad: manual (cincel y martillo) y chorro de arena (*sandblasting*), como se muestra en la Figura 30 y Figura 31, exponiendo agregados gruesos en ambos casos. También se utilizaron agentes de unión acrílico (SMA) y epóxico (SSE). El SGC logró la resistencia más alta: 27.5 MPa en corte inclinado y 1.8 MPa en extracción. La combinación de rugosidad manual con agente acrílico produjo una resistencia de entre 40 % a 50 % mayor que las combinaciones con chorro de arena y epóxico. El SGC superó al concreto de cemento Portland en aproximadamente entre 25 % a 35 % bajo condiciones de interfaz similares. Los modos de falla en la prueba *pull-off* incluyeron falla en la interfaz o en el sustrato.

Los estudios indican que el mejor desempeño en la resistencia de unión por cizallamiento se logra consistentemente con geopolímeros de alta resistencia y alto contenido de escoria (GGBS) (Li et al., 2024; Ling et al., 2024). El GPC 100% Escoria (SGC) registró la resistencia más alta de 27.5 MPa (Mohsen et al., 2025). Esta superioridad se atribuye al mayor contenido de CaO y la reactividad de la escoria, que promueven la formación de geles C-A-S-H densos (Li et al., 2024; Ling et al., 2024).

**Figura 27**

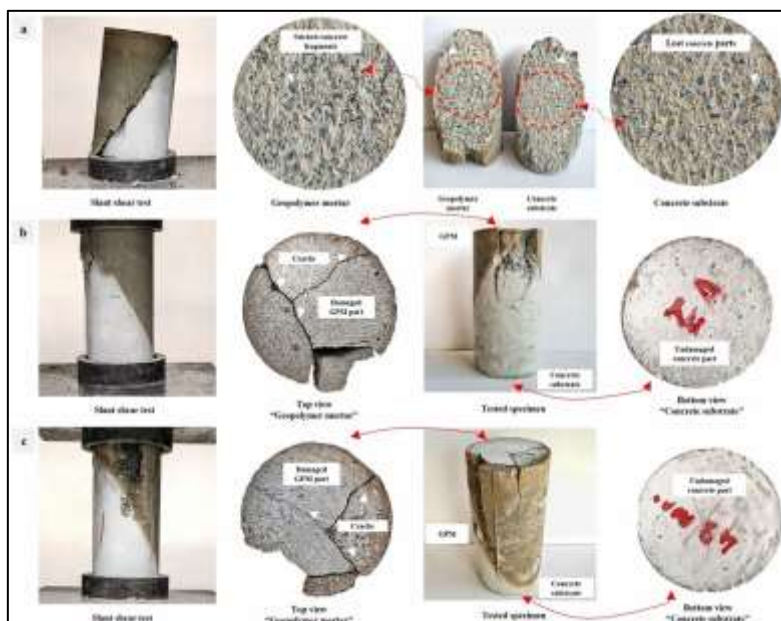
*Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para las probetas NMX*



*Nota.* Tomado de Osman & Irshidat (2025) donde: a. NMX-1día, b. NMX-3días, c. NMX-7días y d. NMX-28días.

**Figura 28**

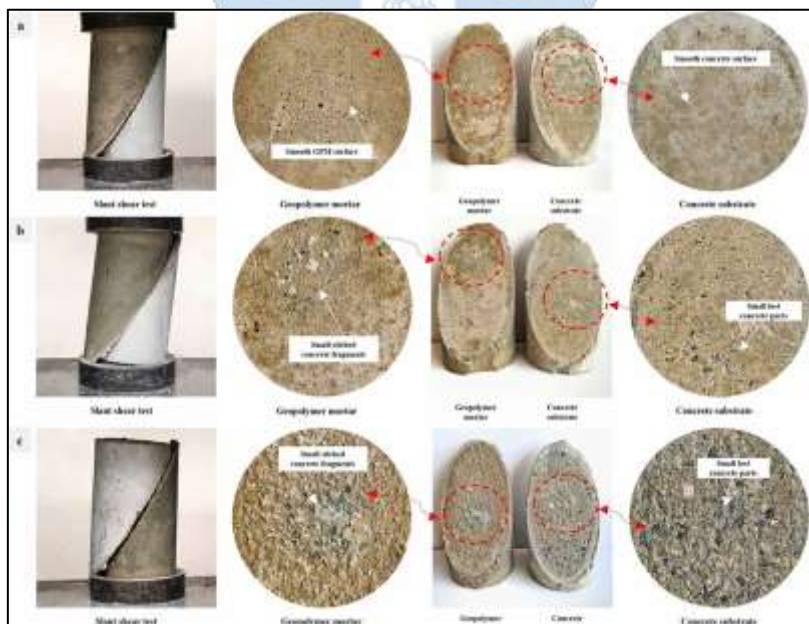
*Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para distintos tipos de probetas*



*Nota.* Tomado de Osman & Irshidat (2025) donde: a. NMX, b. WMX y c. EMX.

**Figura 29**

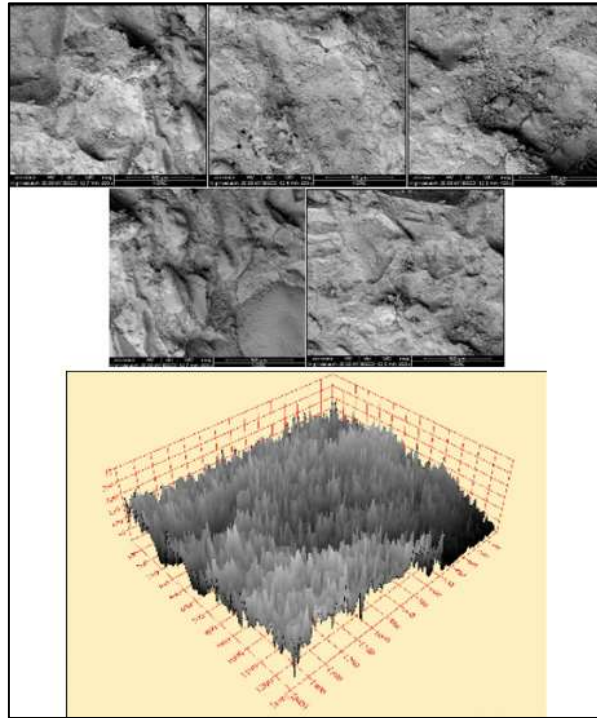
*Modo de falla en el ensayo de corte inclinado para distintos tipos de probetas*



*Nota.* Tomado de Osman & Irshidat (2025) donde: a. WMY, b. EMY y c. NHY.

**Figura 30**

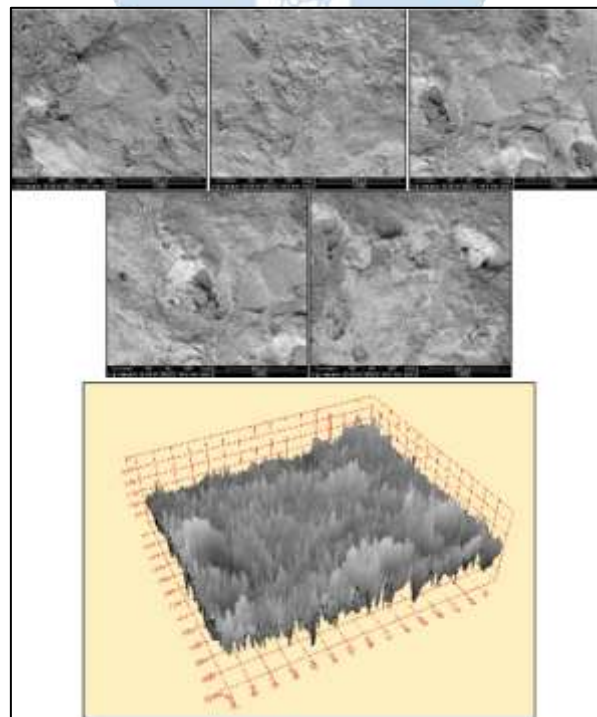
*Imágenes en dos y tres dimensiones de las muestras tratadas con la técnica de rugosidad manual*



*Nota.* Tomado de Mohsen et al. (2025).

**Figura 31**

*Imágenes en dos y tres dimensiones de las muestras tratadas con la técnica de rugosidad chorro de arena*



*Nota.* Tomado de Mohsen et al. (2025).

Las fibras sintéticas (PE y PVA) tuvieron un efecto positivo en la resistencia de unión de los geopolímeros. Este aumento de resistencia se atribuye a la capacidad de las fibras para restringir el daño térmico/hídrico y desviar las microgrietas, mejorando la resistencia a la fractura de la interfaz. Además, la hibridación con PVA sin aceite (relación PE/PVA=1.0) no perjudicó la unión y redujo significativamente los costos, debido a la sustitución de fibras de PE (cotizándose a \$56.00 USD/kg) por fibras de PVA domésticas y más asequibles, cuyos precios rondan entre el 10% y el 20% del costo de las fibras de PE (en este estudio, las fibras de PVA sin aceite tenían un costo de \$6.30 USD/kg) (Ling et al., 2024).

Las condiciones del sustrato que favorecen la resistencia al corte son la alta rugosidad y el uso de sustratos de alta resistencia. La rugosidad manual o la exposición del agregado grueso resultaron en la mayor resistencia, ya que aumentan el área de contacto y mejoran el engranaje mecánico (Li et al., 2024). En cuanto a los agentes de unión, el efecto es contradictorio: el agente acrílico funcionó excepcionalmente bien para el GPC a base de escoria de Mohsen et al. (2025), mientras que degradó drásticamente la unión en el GPM a base de FA/GGBS de Osman & Irshidat (2025), al parecer al interferir con la reacción química de la interfaz. Por lo tanto, la máxima resistencia al corte se logra utilizando geopolímeros fuertes a base de escoria en una superficie rugosa, y asegurando la compatibilidad de cualquier agente de unión para no inhibir la reacción de geopolymerización entre la sobre capa geopolimérica y el sustrato.

A continuación, se presenta la Tabla 8, en la cual se resumen datos relevantes de la adherencia según los ensayos que realizaron los estudios mencionados.

**Tabla 8**

*Tabla resumen de datos relevantes de la adherencia según los ensayos realizados*

Ensayo	Materiales (Reparación / Sustrato)	Condición Clave	Resistencia a la Adherencia (MPa)	Modo de Falla Relevante	Fuente
Corte Inclinado ( <i>Slant Shear</i> )	GC (80, 85, 90 MPa) / NC (30 MPa)	Interfaz crítica (superficie lisa), Análisis Mohr-Coulomb ( $\tau$ )	NC30-GC80: 2.8 MPa	Falla adhesiva (autoadhesión)	Atan et al. (2022)

Ensayo	Materiales (Reparación / Sustrato)	Condición Clave	Resistencia a la Adherencia (MPa)	Modo de Falla Relevante	Fuente
Corte Inclinado ( <i>Slant Shear</i> )	EGC (K321 GP-MS-1.6%PVA) / PCC (30 MPa)	Superficie lisa (condición crítica)	15.64 MPa (subestimada)	Falla del Sustrato (Hormigón)	Arce et al. (2020)
Corte Inclinado ( <i>Slant Shear</i> )	GPM (FA/GGBS) / HMC (21 MPa)	Sustrato de resistencia moderada (28 días)	9.3 MPa (Superficie normal, sin agente)	Deslizamiento del GPM con fragmentos adheridos	Osman & Irshidat (2025)
		Sustrato con Agregado Expuesto (28 días)	12.0 MPa (Superficie más rugosa)	Falla Compresiva del GPM/Sustrato	
		Sustrato con Agente de Adherencia (Normal)	0.78 MPa (Reducción del 94%)	Des adherencia en la interfaz GPM-Hormigón	
Corte Inclinado ( <i>Slant Shear</i> )	GPC (100% Escoria/Slag, SGC) / PCC	Rugosidad Manual + Agente Acrílico (28 días)	27.50 MPa	Falla por Partición ( <i>Splitting Mode</i> )	Mohsen et al. (2025)
		Rugosidad chorro de arena + Agente Epoxi (28 días)	9.00 MPa	Deslizamiento ( <i>Sliding Mode</i> )	
		GPC (FA + Slag, FSGC) (Máx.)	12.85 MPa (Manual + Acrílico)	Deslizamiento	

Ensayo	Materiales (Reparación / Sustrato)	Condición Clave	Resistencia a la Adherencia (MPa)	Modo de Falla Relevante	Fuente
Corte Inclinado ( <i>Slant Shear</i> )	EGC (Híbrido PE/PVA) / C70	Mayor contenido de GGBS (FA/GGBS 5:5) (28 días)	26.1 MPa	El aumento en GGBS mejoró la resistencia al corte	Ling et al. (2024)
		FA/GGBS 7:3, 2.0% PE Fibra (Máx.)	17.5 MPa		
		FA/GGBS 7:3, 2.0% PVA Fibra (Máx.)	21.0 MPa		
Corte Directo ( <i>Direct Shear</i> )	EGC (G95) / C70	Rugosidad Tipo III (Máx. Rugosidad)	3.29 MPa	Falla de grieta alterna	Li et al. (2024)
		EGC (G45) / C50	0.674 MPa (Rugosidad Tipo I, Mínima)	Falla interfacial aserrada	
Tracción Directa ( <i>Direct Tension</i> )	EGC (Híbrido PE/PVA) / C70	2.0% PVA Fibra (28 días)	0.56 MPa	Falla de grieta alterna en la interfaz	Ling et al. (2024)
Tracción ( <i>Pull-off</i> )	GPC (100% Escoria/Slag, SGC) / PCC	Rugosidad Manual + Agente Acrílico (28 días)	1.80 MPa	Falla del Sustrato	Mohsen et al. (2025)

Ensayo	Materiales (Reparación / Sustrato)	Condición Clave	Resistencia a la Adherencia (MPa)	Modo de Falla Relevante	Fuente
		GPC (FA + Slag, FSGC) (Mín.)	0.94 MPa (Chorro de arena + Epoxi)	Falla de Interfaz	

### 3.5 Comparación con sistemas tradicionales de reparación

Los geopolímeros y los sistemas tradicionales basados en cemento Portland presentan diferencias sustanciales en cuanto a sostenibilidad, desempeño mecánico, durabilidad y comportamiento interfacial. Desde el punto de vista ambiental, los geopolímeros muestran una clara superioridad debido a que permiten reducir entre un 40 % y un 80 % las emisiones de dióxido de carbono, ya que emplean subproductos industriales como ceniza volante o escoria granulada, además de requerir aproximadamente un 60 % menos energía en su producción. En contraste, los sistemas tradicionales de cemento Portland son intensivos en energía y su fabricación contribuye aproximadamente con el 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, lo cual representa una desventaja significativa en términos de sostenibilidad (Ali et al., 2016; Khasawneh, 2025; Saba & Arairol, 2024; Shaikh, 2016).

En cuanto a resistencia química, los geopolímeros exhiben un comportamiento notablemente superior, ya que muestran alta resistencia frente a ambientes agresivos, ataques de ácidos y sulfatos, así como una mayor estabilidad frente a procesos de corrosión (Saba & Arairol, 2024). Por el contrario, los materiales cementicios convencionales presentan un desempeño moderado, siendo vulnerables a la degradación en presencia de sulfatos o soluciones ácidas. Esta diferencia se amplía al examinar la resistencia al fuego, donde los geopolímeros mantienen más del 90 % de su resistencia incluso a temperaturas cercanas a los 800 °C, mientras que los materiales basados en cemento Portland presentan un rendimiento menor, con pérdidas significativas de capacidad mecánica en condiciones de alta temperatura (Khasawneh, 2025).

Las propiedades mecánicas también presentan contrastes relevantes. Los geopolímeros alcanzan resistencias a compresión mayores a los 60 MPa, pudiendo superar los 100 MPa en formulaciones optimizadas, aunque generalmente presentan un módulo de elasticidad algo menor que el del cemento Portland. Esta menor rigidez puede ser ventajosa en escenarios de diseño sismorresistente. Por su parte, el concreto Portland alcanza resistencias entre 20 y 60 MPa y presenta un módulo de elasticidad más elevado, asociado con un comportamiento más rígido (Khasawneh, 2025; Ranjbar & Zhang, 2020; Saba & Arairol, 2024). Tanto los geopolímeros como el cemento Portland muestran un comportamiento frágil en ausencia de fibras; sin embargo, la incorporación de refuerzo fibroso transforma de manera

notable la respuesta del material (Benfratello et al., 2025; Ling et al., 2024). En el caso de los geopolímeros reforzados con fibras, se observa un comportamiento de pseudo-endurecimiento por deformación y un excelente control de fisuración, logrando mantener aperturas de grieta inferiores a 100  $\mu\text{m}$ , así como una mayor tenacidad y capacidad de absorción de energía (Benfratello et al., 2025). Los concretos tradicionales reforzados con fibras suelen presentar un patrón de ablandamiento por deformación, por lo que su fabricación implica una mayor carga ambiental debido al uso intensivo de cemento (Li et al., 2024; Ling et al., 2024).

En términos de adherencia interfacial, los geopolímeros destacan nuevamente, ya que presentan propiedades de unión superiores a las de los materiales basados en cemento Portland. Una matriz geopolimérica elaborada con 100 % de escoria puede alcanzar valores de resistencia al corte por inclinación hasta un 25 - 35 % mayores que los obtenidos por el concreto Portland en condiciones similares de interfaz, lo cual resulta crítico en aplicaciones de reparación (Ali et al., 2016; Mohsen et al., 2025). En contraposición, la zona de transición interfacial de los materiales cementicios suele constituir el punto más débil de la reparación y el origen de fallos prematuros (Li et al., 2024; Osman & Irshidat, 2025).

Respecto al costo, los geopolímeros pueden presentar mayores gastos iniciales debido al precio de los activadores alcalinos y de fibras de alto rendimiento como PVA aceitado o PE. Sin embargo, los análisis de costo del ciclo de vida indican que los geopolímeros presentan menores costos a largo plazo por su mayor durabilidad y menor necesidad de intervenciones posteriores (Khasawneh, 2025; Ling et al., 2024).

El proceso de curado también evidencia diferencias. Los geopolímeros pueden ser sensibles a las condiciones de curado y, en algunos casos, requieren temperaturas elevadas cercanas a los 60 °C para desarrollar resistencia temprana; no obstante, cuando se incorpora escoria granulada, es posible obtener curado efectivo a temperatura ambiente. Los sistemas tradicionales basados en cemento Portland, por su parte, tienen procesos de curado ampliamente establecidos y menos dependientes de condiciones estrictas (Saba & Arairol, 2024). En cuanto al manejo y la seguridad, los geopolímeros demandan mayor precaución, ya que sus activadores alcalinos alcanzan valores de pH entre 13.1 y 14.7 y requieren el uso de equipo especializado de protección personal. El cemento Portland, aunque también requiere cuidados, implica un manejo más familiar y con riesgos más estandarizados (Arce et al., 2020).

Esta comparación evidencia que los geopolímeros presentan ventajas significativas sobre los sistemas tradicionales en la mayoría de los parámetros críticos de sostenibilidad, durabilidad, resistencia química y capacidad de hibridación con fibras, mientras que los materiales cementicios tradicionales mantienen ventajas en costo inicial, estandarización normativa y simplicidad operativa. La selección entre ambos no sólo depende de las propiedades mecánicas o del rendimiento a corto plazo, sino también de los objetivos de durabilidad, sostenibilidad y resiliencia estructural a largo plazo.

En resumen, el geopolímero, en especial en formulaciones con alto contenido de escoria y en sus variantes reforzadas con fibras, se ha consolidado como el material más adecuado para la reparación y rehabilitación del concreto, superando ampliamente a los sistemas tradicionales basados en cemento Portland en casi todos los aspectos críticos, salvo en el costo inicial y en la familiaridad que la industria mantiene con los materiales cementicios convencionales. Su superioridad se sustenta en una durabilidad notablemente mayor, ya que presenta una resistencia significativamente superior frente a la corrosión por ácidos y sulfatos, así como frente a la exposición prolongada al fuego, lo que reduce de manera sustancial las necesidades de mantenimiento y los gastos de reemplazo a largo plazo, impactando positivamente en el costo del ciclo de vida.

Además, cuando se formula como compuesto reforzado con fibras, el geopolímero adquiere la ductilidad necesaria para evitar fallas frágiles y muestra un control de fisuras basado en mecanismos de pseudoendurecimiento por deformación que el concreto convencional no logra, permitiendo que las reparaciones soporten movimientos o tensiones residuales sin comprometer su integridad. A esto se suma una adherencia excepcional al sustrato, especialmente en mezclas con abundante escoria, que han demostrado desarrollar una unión capaz de provocar que la falla ocurra en el concreto existente y no en la interfaz, que tradicionalmente constituye el punto más débil de las reparaciones con cemento Portland.

Finalmente, su importancia ambiental resulta determinante, dado que constituye una alternativa que contribuye a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al reemplazar el clínker de cemento, altamente intenso en carbono, por activadores derivados de subproductos industriales. En conjunto, el geopolímero, en especial con fibra incorporada, representa una solución de reparación altamente duradera, sostenible y técnicamente superior, siempre que se optimice adecuadamente el diseño de mezcla mediante el uso de escoria granulada para permitir el curado a temperatura ambiente y se garanticen procesos correctos de preparación superficial que maximicen su potencial de adherencia.

## Conclusiones

La evidencia recopilada demuestra que las fibras utilizadas en geopolímeros abarcan una amplia diversidad de fuentes (naturales, sintéticas y minerales), cada una con efectos diferentes en la resistencia, ductilidad, retracción, fluencia, permeabilidad y comportamiento frente a congelamiento-deshielo. En síntesis, los resultados permiten concluir que la incorporación de fibras mejora sustancialmente el desempeño mecánico y de durabilidad del geopolímero, siempre que se controlen parámetros como el contenido, longitud, dispersión y tratamiento superficial para evitar pérdida de cohesión o incremento de porosidad.

Los datos encontrados muestran que las fibras naturales aportan sostenibilidad y mejoran la tenacidad, aunque requieren tratamientos para evitar vacíos; las fibras sintéticas (PP, PVA) destacan por su control de fisuración, reducción de retracción y contribución moderada a la resistencia y rigidez; y las fibras minerales (basalto, vidrio, acero, carbono) ofrecen el desempeño más robusto en términos de rigidez (E), durabilidad, resistencia química y comportamiento frente a ciclos térmicos. Estas diferencias confirman que la selección del tipo de fibra debe basarse en la propiedad de reparación requerida: ductilidad, rigidez, resistencia a ciclos térmicos o protección frente a penetración de fluidos.

Los ensayos de adherencia entre geopolímero y concreto revelan que los compuestos geopoliméricos, particularmente aquellos ricos en escoria y reforzados con fibras sintéticas como PE o PVA, logran resistencias de unión que igualan o superan significativamente a los sistemas basados en cemento Portland, llegando incluso a provocar fallas en el concreto sustrato en lugar de la interfaz de reparación. Las superficies rugosas o con agregado expuesto incrementan aún más esta capacidad de unión. Este desempeño confirma la viabilidad del geopolímero con fibra como material de reparación estructural, con un comportamiento superior frente a agentes agresivos, cargas sostenidas y ciclos ambientales severos.

De manera global, se concluye que los geopolímeros reforzados con fibras representan un material de reparación altamente competitivo, y en la mayoría de métricas, superior, frente a los sistemas tradicionales de cemento Portland. Su mayor adherencia, resistencia química, capacidad de controlar fisuras, desempeño frente a ciclos térmicos y potencial de sostenibilidad, lo posicionan como una opción avanzada para la reparación de estructuras. Sin embargo, los beneficios dependen de un diseño correcto del sistema: selección adecuada de fibras, tratamiento superficial, control de porosidad y compatibilidad con el sustrato. Cuando estos parámetros se optimizan, los geopolímeros ricos en escoria superan ampliamente las limitaciones del cemento Portland, lo que evidencia la necesidad de reforzar su estudio, difusión y adopción como material de referencia en intervenciones de reparación.

## Recomendaciones

Se recomienda enfocar las futuras líneas de investigación en la validación experimental y la optimización de los sistemas de geopolímeros reforzados con fibras. A pesar de que la revisión confirma la superioridad de estos materiales como alternativa sostenible, las conclusiones indican que los beneficios dependen de un diseño correcto del sistema. Es esencial realizar estudios que determinen el contenido, longitud, dispersión y tratamiento superficial óptimo de las fibras (naturales, sintéticas y minerales) para evitar la pérdida de cohesión o el incremento de porosidad, y así maximizar la adherencia y el desempeño mecánico y de durabilidad. Esto implica una investigación más profunda sobre la interfaz fibra-matriz, donde la adherencia del material es sensible al contenido de fibra, siendo contenidos superiores al 1 % - 2 % en peso perjudiciales por aglomeración y formación de vacíos. Además, es crucial incentivar la producción científica en español, dado que la gran mayoría de los estudios identificados se encuentran en idioma inglés, para abarcar investigaciones regionales y experiencias aplicadas, lo que abordaría la limitada disponibilidad de literatura en castellano sobre esta línea de investigación.

Para fomentar la difusión y la adopción de los geopolímeros reforzados con fibras en la práctica de la ingeniería civil, se debe aprovechar la evidencia de que son técnicamente superiores al cemento Portland en casi todos los aspectos críticos. Esto se sustenta en su mayor adherencia interfacial, que puede causar fallas en el sustrato de concreto y no en la interfaz, su alta resistencia química, y su capacidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Se recomienda promover la implementación de normativas y la capacitación profesional que valide y estandarice el uso de formulaciones optimizadas, particularmente aquellas ricas en escoria granulada, ya que estas permiten el curado efectivo a temperatura ambiente, mitigando la sensibilidad a las condiciones de curado. La difusión debe hacer énfasis en el análisis del costo del ciclo de vida, ya que la mayor durabilidad y menor necesidad de intervenciones posteriores de los geopolímeros compensan su posible mayor costo inicial, posicionándolos como el material de referencia para reparaciones sostenibles y durables.

## Lista de abreviaturas

ACI: American Concrete Institute.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CP: Cemento Portland.

EN: European Norm.

FA: Ceniza volante.

FC: Fibra de carbono.

FCBP: Polvo de ladrillo de arcilla cocida.

ICRI: International Concrete Repair Institute.

MK: Metacaolín.

NP: Puzolana natural.

PE: Polietileno

PP: Polipropileno.

PVA: Alcohol polivinílico.



## Referencias

- Abbas, A., Abdul Aziz, F. N. A., Abdan, K., Mohd Nasir, N. L., & Huseien, G. F. (2022). A state-of-the-art review on fibre-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 330, 127187-127187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127187>
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., & Dalvand, A. (2017). *Comparative Study on the Effects of Recycled Glass–Fiber on Drying Shrinkage Rate and Mechanical Properties of the Self-Compacting Mortar and Fly Ash–Slag Geopolymer Mortar*. 29(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001918](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001918)
- Abdollahnejad, Z., Zhang, Z., Wang, H., & Mastali, M. (2018). Comparative Study on the drying shrinkage and mechanical properties of geopolymer foam concrete incorporating different dosages of fiber, sand and foam agents. En D. A. Hordijk & M. Lukovic (Eds.), *Proceedings of the 2017 fib Symposium* (pp. 42-48). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_6)
- Aceves, M. F., Ortega, U. G., & Ahtziri Pérez De Jesús. (2018). *Caracterización de la fibra de Yute*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11737.57447>
- American Concrete Institute (ACI). (2014). *Concrete Repair Guide (ACI 546.3R-14)*. ACI.
- American Concrete Institute (ACI). (2010). *Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation (ACI 364.5T-10)*. ACI.
- Ahmad Zailani, W. W., Bouaissi, A., Abdullah, M. M. A. B., Abd Razak, R., Yoriya, S., Mohd Salleh, M. A. A., Rozainy M. A. Z., M. R., & Fansuri, H. (2020). Bonding Strength Characteristics of FA-Based Geopolymer Paste as a Repair Material When Applied on OPC Substrate. *Applied Sciences*, 10(9), 3321. <https://doi.org/10.3390/app10093321>
- Al-Ghazali, N. A., Abdul Aziz, Farah Nora Aznieta, Abdan, K., & Mohd Nasir, N. A. (2022). Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Geopolymer Composites: A review. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 30(3), 979–998.
- Ali, A., Thomas, J., & Parappattu, N. B. (2016). GEOPOLYMER AS REPAIR MATERIAL - A REVIEW. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 3(09).
- Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I.-M. (2015). Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 272-281. <https://doi.org/10.1007/s40145-015-0161-1>
- ASTM International. (2024). Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete (ASTM C157/C157M). <https://www.astm.org>
- Aswani, E., & Lathi, K. (2017). A Literature Review on Fiber Reinforced Geopolymer Concrete. 2, 8.

- Atan, H., Othman, N. H., A. Khalid, N. H., Sainudin, M. S., & A.Tayeh, B. (2022). Bonding Strength between Geopolymer Fly Ash to Ordinary Portland Cement Concretes using Mohr-Coulomb Theory. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(4), 238-243. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.04.021>
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, 47, 424-442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>
- Balaguru, P. N. (with Internet Archive). (1992). *Fiber-reinforced cement composites*. New York : McGraw-Hill. <http://archive.org/details/fiberreinforcedc0000bala>
- Baris, K. E., & Tanaçan, L. (2023). *Durability behavior of banana fiber-reinforced natural pozzolan geopolymer*. 18(4), 149-168. <https://doi.org/10.3992/jgb.18.4.149>
- Batista dos Santos, G. Z., Passos de Oliveira, D., de Almeida Melo Filho, J., & Marques da Silva, N. (2021). Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. *Journal of Building Engineering*, 43, 102568. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102568>
- Bayraktar, O. Y., Tobbala, D. E., Turkoglu, M., Kaplan, G., & Tayeh, B. A. (2023). Hemp fiber reinforced one-part alkali-activated composites with expanded perlite: Mechanical properties, microstructure analysis and high-temperature resistance. *Construction and Building Materials*, 363, 129716. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129716>
- Benfratello, S., Palizzolo, L., Sanfilippo, C., Valenza, A., & Ullah, S. (2025). The Structural Performance of Fiber-Reinforced Geopolymers: A Review. *Eng*, 6(7), 159. <https://doi.org/10.3390/eng6070159>
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (2.<sup>a</sup> ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
- Bhalchandra, S., & Bhosle, A. (2013). *Properties of Glass Fibre Reinforced Geopolymer Concrete*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Properties-of-Glass-Fibre-Reinforced-Geopolymer-Bhalchandra-Bhosle/b7df9f3bfee67a4a39931a4b4856c790318e7d00>
- Bian, Y., Song, F., Liu, H., Li, R., & Xiao, C. (2024). Study on the performance of basalt fiber geopolymer concrete by freeze-thaw cycle coupled with sulfate erosion. *AIP Advances*, 14(1), 015136. <https://doi.org/10.1063/5.0187990>
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221-274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)

- Bozok, H. (2025). *Uso de cenizas volantes en el hormigón by HASAN BOZOK* Direct Industry. <https://trends.directindustry.es/opt-makine/project-239125-1133758.html>
- Cajigas, E. (2019, julio 10). *Los nuevos sustitutos del plástico: Cáñamo, lino y coco*. <https://www.ecoportel.net/paises/los-nuevos-sustitutos-del-plastico-canamo-lino-y-coco/>
- Camargo, M., Adefrs Taye, E., Roether, J., Tilahun Redda, D., & Boccaccini, A. (2020). A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites. *Materials*, 13(20), 4603. <https://doi.org/10.3390/ma13204603>
- Castañeda, D., Silva, G., Salirrosas, J., Kim, S., Bertolotti, B., Nakamatsu, J., & Aguilar, R. (2020). Production of a lightweight masonry block using alkaline activated natural pozzolana and natural fibers. *Construction and Building Materials*, 253, 119143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119143>
- Castañeda Granda, D. I. (2019). *Desarrollo de bloques de construcción ligeros mediante el uso de geopolímeros a base de puzolana natural*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chan, C. L., & Zhang, M. (2022). Behaviour of strain hardening geopolymer composites at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 132, 104634. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104634>
- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 8(2), 194–206
- Czarnecki, L., Geryło, R., & Kuczyński, K. (2020). Concrete Repair Durability. *Materials*, 13(20), 4535. <https://doi.org/10.3390/ma13204535>
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis*, 35(2), 429-441. <https://doi.org/10.1007/BF01904446>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer: Chemistry & applications* (5th ed). Institut Géopolymère.
- Deng, Z., Yang, Z., Bian, J., Pan, X., Wu, G., Guo, F., Fu, R., Yan, H., Deng, Z., & Chen, S. (2022). Engineering Properties of PVA Fibre-Reinforced Geopolymer Mortar Containing Waste Oyster Shells. *Materials*, 15(19), 7013. <https://doi.org/10.3390/ma15197013>
- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- EN 1504-3: *Structural and non-structural repair*. (2006).
- Arce, G., Hassan, M., Radovic, M. & Sukhishvili, S. (2020). Engineered Geopolymer Composites (EGCs) for sustainable transport (Final Report). *Transportation Consortium of South-Central States (Tran-SET)*. University Transportation Center for Region.
- Eswaramoorthi, P., & Arunkumar, G. E. (2014). Fibers Study On Properties Of Geopolymerconcrete With Polypropylene. 2, 3, 60-75.
- Farhan, K. Z., Azmi Megat Johari, M., & Demirboğa, R. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 345, 128339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>
- Farhan, K. Z., Megat, A. M. J., & Demirboğa, R. (2023). Performance of polypropylene fiber reinforced GGBFS-based alkali activated composites under sulfate and freeze–thaw conditions. *Materials and Structures*, 56(2), 44. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02137-5>
- Filazi, A., Akat, R., Pul, M., Tortuk, S., & Özdin, A. (2025). Physical Structural Mechanical and Thermal Insulation Properties of Hemp Fiber-Substituted Geopolymer Composites. *Materials*, 18(11), 2536. <https://doi.org/10.3390/ma18112536>
- Furtos, G., Prodan, D., Sarosi, C., Moldovan, M., Korniejenko, K., Miller, L., Fiala, L., & Iveta, N. (2024). Mechanical Properties of MiniBars™ Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Composites. *Materials*, 17(1), 248. <https://doi.org/10.3390/ma17010248>
- Gailitis, R., Pakrastins, L., Sprince, A., Radina, L., Sakale, G., & Miernik, K. (2022). Different Fiber Reinforcement Effects on Fly Ash-Based Geopolymer Long-Term Deflection in Three-Point Bending and Microstructure. *Materials*, 15(23), 8512. <https://doi.org/10.3390/ma15238512>
- Gailitis, R., Sprince, A., Kozlovskis, T., Radina, L., Pakrastins, L., & Vatin, N. (2021). Long-Term Properties of Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash-Based Geopolymer Composite. *Crystals*, 11(7), 760. <https://doi.org/10.3390/cryst11070760>
- Gailitis, R., Sprince, A., Łach, M., Gavrilovs, P., & Pakrastins, L. (2023). Cyclic Load Impact Assessment of Long-Term Properties in Compression to Steel and Polyvinyl Alcohol Fibre-Reinforced Geopolymer Composites. *Materials*, 16(18), 6128. <https://doi.org/10.3390/ma16186128>

- Ganesan, N., Abraham, R., & Deepa Raj, S. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 471-476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014>
- Gholampour, A., Danish, A., Ozbakkaloglu, T., Yeon, J. H., & Gencil, O. (2022). Mechanical and durability properties of natural fiber-reinforced geopolymers containing lead smelter slag and waste glass sand. *Construction and Building Materials*, 352, 129043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129043>
- Guo, G., Lv, C., Liu, J., & Wang, L. (2022). Properties of Fiber-Reinforced One-Part Geopolymers: A Review. *Polymers*, 14(16), 3333. <https://doi.org/10.3390/polym14163333>
- Guru Kumar, M. S., Murugesan, B., & Kumar, A. (2021). A Review on the Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Compressed Earth Blocks. *Journal of Natural Fibers*, 19, 1-15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1958405>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hajjabadi, S. H., Khalifeh, M., Van Noort, R., & Silva Santos Moreira, P. H. (2023). Review on Geopolymers as Wellbore Sealants: State of the Art Optimization for CO<sub>2</sub> Exposure and Perspectives. *ACS Omega*, 8(26), 23320-23345. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01777>
- Hernández-Leal, E., Franco Gaytán, I., Maltos-Buendía, J., & González, A. (2022). *Determinación de la calidad de fibra del cultivo de algodón*.
- Heweidak, M., Kafle, B., & Al-Ameri, R. (2023). Influence of Discrete Basalt Fibres on Shrinkage Cracking of Self-Compacting Ambient-Cured Geopolymer Concrete. *Journal of Composites Science*, 7(5), 202. <https://doi.org/10.3390/jcs7050202>
- Hossain, K. M. A., & Sood, D. (2023). Shrinkage, Permeation and Freeze–Thaw Characteristics of Ambient Cured High Calcium-Based Alkali-Activated Engineered Composites. *Materials*, 16(22), 7101. <https://doi.org/10.3390/ma16227101>
- Khan, A. M., Elahi, A., Waqas, R. M., Kirgiz, M. S., Nagaprasad, N., & Ramaswamy, K. (2025). Influence of bentonite, silica fume, and polypropylene fibers on green concrete for pavement and structural durability. *Scientific Reports*, 15(1), 29567. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13313-8>
- Khasawneh, M. A. (2025). Geopolymer concrete in construction projects: A review. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 124. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00281-1>

- Korniejenko, K., Fraçzek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. *151*, 388-393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>
- Korniejenko, K., Łach, M., Doğan Sağlamtimur, N., Furtos, G., & Mikuła, J. (2020). The overview of mechanical properties of short natural fiber reinforced geopolymer composites. *Environmental Research and Technology*, *3*(1), 28-39. <https://doi.org/10.35208/ert.671713>
- Kumar, K., Ravi, D., Gupta, M., Raj, P., S.P, S., & P.s, J. (2023). Elimination of Global Warming Gas Emissions by Utilizing High Reactive Metakaolin in High Strength Concrete for Eco-friendly Protection. *Materials Research Express*, *10*. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acead8>
- Lau, A. K., & Cheung, K. H. Y. (2017). Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites. *ScienceDirect*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100656-6.00001-7>
- Li, F., Chen, D., Yang, Z., Lu, Y., Zhang, H., & Li, S. (2022). Effect of mixed fibers on fly ash-based geopolymer resistance against carbonation. *Construction and Building Materials*, *322*, 126394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126394>
- Li, W., Shumuye, E. D., Shiyang, T., Wang, Z., & Zerfu, K. (2022). Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00894>
- Li, Z., Li, J., Lu, W., & Zhang, Y. (2025). Research Progress and Application Prospects of Plant Fibers in Geopolymer Concrete: A Review. *Materials*, *18*(10), 2342. <https://doi.org/10.3390/ma18102342>
- Li, Z., Tan, J., Ouyang, J., Yu, Y., Li, S., Lin, T., Liu, R., & Li, W. (2024). *Experimental Investigation of the Bond Performance at the Interface between Engineered Geopolymer Composites and Existing Concrete*. *14*. <https://doi.org/10.3390/buildings14061819>
- Ling, Y., Zhang, X., Wu, Y., Zou, W., Wang, C., Li, C., & Li, W. (2024). Evaluation of Bonding Behavior between Engineered Geopolymer Composites with Hybrid PE/PVA Fibers and Concrete Substrate. *Materials*, *17*(15), 3778. <https://doi.org/10.3390/ma17153778>
- Luan, C., Shi, X., Wang, Q., Utashev, N., Tufail, R. F., & Maqsoom, A. (2022). Carbonation performances of steel fiber reinforced geopolymer concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *50*(4), 294-305. <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0797>
- Merta, I., Poletanovic, B., Dragas, J., Carevic, V., Ignjatovic, I., & Komljenovic, M. (2022). The Influence of Accelerated Carbonation on Physical and Mechanical Properties of Hemp-

- Fibre-Reinforced Alkali-Activated Fly Ash and Fly Ash/Slag Mortars. *Polymers*, 14(9), 1799. <https://doi.org/10.3390/polym14091799>
- Mohamed, O., & Zuaiter, H. (2024). Fresh Properties, Strength, and Durability of Fiber-Reinforced Geopolymer and Conventional Concrete: A Review. *Polymers*, 16(1), 141. <https://doi.org/10.3390/polym16010141>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276-277(1), 1-24. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1%253C1::AID-MAME1%253E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1%253C1::AID-MAME1%253E3.0.CO;2-W)
- Mohsen, K., Yousif, I. A., Sadek, E. F., & Morsy, K. M. (2025). Eexperimental study of interface behaviour of geopolymer concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 32696. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20036-3>
- Moujoud, Z., Sair, S., Ait Ousaleh, H., Ayouch, I., El Bouari, A., & Tanane, O. (2023). Geopolymer composites reinforced with natural Fibers: A review of recent advances in processing and properties. *Construction and Building Materials*, 388, 131666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131666>
- Nogueira, A., De Barros, S., & Alves, L. (2020). Fiber-matrix Adhesion on Industrial Geopolymer. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 17(3). <https://doi.org/10.22068/ijmse.17.3.85>
- Ohno, M., & Li, V. C. (2019). Sulfuric acid resistance of strain hardening fiber reinforced geopolymer composite. *The Indian Concrete Journal*, 93(12), 47-53.
- Osman, A. Y., & Irshidat, M. R. (2025). Bond Strength Development of Ambient-Cured Sustainable Geopolymer Mortar to Concrete Substrate. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10534-x>
- Pacheco Torgal, F., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-892-8>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco-Varela, M. T. (1999). *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*. 29, 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Patil, S. S., & Patil, A. A. (2015). *Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Concrete*. 5(4).
- Pham, K. V. A., Nguyen, T. K., Le, T. A., Han, S. W., Lee, G., & Lee, K. (2019). Assessment of Performance of Fiber Reinforced Geopolymer Composites by Experiment and Simulation Analysis. *Applied Sciences*, 9(16), 3424. <https://doi.org/10.3390/app9163424>

- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Porpadham, T., Thirugnanasambandam, S., Chate, V. R., Verma, A., & Tajuddin, F. N. (2025). Optimizing Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete for Sustainable Construction Practices. *E3S Web of Conferences*, 621, 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562101014>
- Provis, J. L. (2013). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9781845694494/geopolymers>
- Qin, L., Yan, J., Zhou, M., Liu, H., Wang, A., Zhang, W., Duan, P., & Zhang, Z. (2023). Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolymer composites: A review on recent progress. *Engineering Reports*, 5(12), e12708. <https://doi.org/10.1002/eng2.12708>
- Qu, W., Niu, B., Lv, C., & Liu, J. (2024). A Review of Sisal Fiber-Reinforced Geopolymers: Preparation, Microstructure, and Mechanical Properties. *Molecules*, 29(10), 2401. <https://doi.org/10.3390/molecules29102401>
- Qu, Y., Li, W., Wang, C., Cao, H., & Zhou, R. (2024). Study on the Reinforced Properties of Geopolymer Fibers with a Sustainable Development Role. *Sustainability*, 16(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/su16146255>
- Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Rguibi, Y. E. B., Baraka, A. E., & Khaldoun, A. (2018). Eco-Friendly Fired Clay Bricks. *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702923>
- Růžek, V., Dostayeva, A. M., Walter, J., Grab, T., & Korniejenko, K. (2023). Carbon Fiber-Reinforced Geopolymer Composites: A Review. *Fibers*, 11(2), 17. <https://doi.org/10.3390/fib11020017>
- Saba, M., & Arai, W. (2024). Perspective Chapter: Geopolymers in Civil and Environmental Engineering Applications. En P. Kryvenko & A. Palomo (Eds.), *Materials Science* (Vol. 4). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007018>

- Sathish Kumar, V., Blessen Skariah, T., & Alex, C. (2012). *An Experimental Study on the Properties of Glass Fibre Reinforced Geopolymer Concrete*. 2(6), 722-726.
- Savastano, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 379-384. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2)
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Seyrek, Y., Rudić, O., Juhart, J., Grengg, C., Charry, E. M., Freytag, B., & Mittermayr, F. (2024). On drying shrinkage of geopolymer and how to mitigate it with vegetable oil. *Construction and Building Materials*, 436, 137013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137013>
- Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.009>
- Si, R., Zhan, Y., Zang, Y., Sun, Y., & Huang, Y. (2023). Effect of basalt fiber on fracture properties and drying shrinkage of alkali-activated slag with different silicate modulus. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 552-569. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.211>
- Silva, F. D. A., Mobasher, B., Soranakom, C., & Filho, R. D. T. (2011). Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 814-823. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.003>
- Silva, G., Castañeda, D., Kim, S., Castañeda, A., Bertolotti, B., Ortega-San-Martin, L., Nakamatsu, J., & Aguilar, R. (2019). Analysis of the production conditions of geopolymer matrices from natural pozzolana and fired clay brick wastes. *Construction and Building Materials*, 215, 633-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.247>
- Silva, G., Kim, S., Aguilar, R., & Nakamatsu, J. (2020). Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. *Sustainable Materials and Technologies*, 23, e00132. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>
- Silva Mondragón, G. L. (2018). *Development of an eco-friendly composite based on geopolymer matrix produced with fired clay brick powder and reinforced with natural fibers*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Sukontasukkul, P., Intarabut, D., Phoo-ngernkham, T., Suksiripattanapong, C., Zhang, H., & Chindaprasirt, P. (2023). Self-compacting steel fibers reinforced geopolymer: Study on mechanical properties and durability against acid and chloride attacks. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02298. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02298>
- Tan, J., Huang, Y., Liu, L., Yu, S., & Zheng, G. (2021). Preparation and Freeze-Thaw Resistance of Geopolymer-Based Natural Plant Fiber Composites. En D. Dobrotă & C. Cheng (Eds.), *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE210298>
- Theurer, M. (2016). *Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras*.
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Joaquim, A. P., & Savastano, H. (2010). Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Construction and Building Materials*, 24(2), 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018>
- Vargas, C. (2023, septiembre 23). Soluciones para manejo de relaves en minería. *Grupo Hidraulica*. <https://grupohidraulica.com/noticias/2023/09/23/soluciones-para-manejo-de-relaves-en-mineria/>
- Venugopal, V., & Arthanareswaran, R. (2015). *Experimental Study on Strength Properties of Polypropylene Fibre Reinforced Geopolymer Concrete*. 4(13).
- Vijai, K., Rathinam, R. K., & Vishnuram, B. G. (2012). *Investigations on properties of glass fibre reinforced fly ash based geopolymer concrete*. 5, 817-824.
- Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). *LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE: LONG-TERM PROPERTIES*. Curtin University of Technology.
- Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., & Yu, G. (2023). The Influence of Fiber on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers*, 15(4), 827. <https://doi.org/10.3390/polym15040827>
- Wang, Y., Hu, S., & Sun, X. (2022). Experimental investigation on the elastic modulus and fracture properties of basalt fiber–reinforced fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 338, 127570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127570>
- Wongsa, A., Kunthawatwong, R., Naenudon, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2020). Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 241, 118143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118143>

- Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Militz, H., & Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806-819. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- Xuan, X., Tan, J., Huang, Y., Xie, M., & Zheng, G. (2020). *Preparation and Freeze Resistance of Geopolymer-Bagasse Fiber Composites*. 39(2).
- Yaakob, S. M., Sufian, S., Rabat, N. E., & Azizli, K. A. M. (2019). *The Microstructural and Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Geopolymer Composites*. 15.
- Yang, X., Zhang, Y., & Lin, C. (2022). Microstructure Analysis and Effects of Single and Mixed Activators on Setting Time and Strength of Coal Gangue-Based Geopolymers. *Gels*, 8(3), 195. <https://doi.org/10.3390/gels8030195>
- Yildirim, A. K., Yildirim, S. T., & Hilal, N. (2025). Effect of glass and nylon fibers on drying shrinkage of alkali activated blast furnace slag mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(2), 295-308. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2389157>
- Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Hiroki, G., Phoo-ngernkham, T., Thumrongvut, J., Sukontasukkul, P., & Chindaprasirt, P. (2024). *Performance of Polypropylene Fiber-Reinforced Cellular Lightweight Fly Ash Geopolymer Mortar under Wet and Dry Cycles | Request PDF*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03233>
- Yuan, Z., Jia, Y., & Xu, J. (2025). Study on the Improvement Effect of Polypropylene Fiber on the Mechanical Properties and Freeze–Thaw Degradation Performance of High Fly Ash Content Alkali-Activated Fly Ash Slag Concrete. *Polymers*, 17(2), 175. <https://doi.org/10.3390/polym17020175>
- Zhang, X., Wang, Y., Han, J., & Li, X. (2025). Creep and mechanical behavior after sustained loading of red mud-slag based geopolymer concrete at early-age. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e04980. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04980>
- Zhao, N., Wang, S., Quan, X., Xu, F., Liu, K., & Liu, Y. (2021). Behavior of polyvinyl alcohol fiber reinforced geopolymer composites under the coupled attack of sulfate and freeze-thaw in a marine environment. *Ocean Engineering*, 238, 109734. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109734>
- Zhen, H., Xiong, Z., Song, Y., Li, L., Qiu, Y., Zou, X., Chen, B., Chen, D., Liu, F., & Ji, Y. (2024). Early mechanical performance of glass fibre-reinforced manufactured sand concrete. *Journal of Building Engineering*, 83, 108440. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108440>
- Zulfiati, R., Saloma, & Idris, Y. (2019). Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer with Natural Fiber. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(8), 082021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/8/082021>