

Materiales activados alcalinamente reforzados con fibras bajo exposición térmica y química: revisión sistemática

Fiber-Reinforced Alkali-Activated Materials under Thermal and Chemical Exposure: A Systematic Review

GABRIEL JESÚS MONTÚFAR CHIRIBOGA^{1*} **Afiliación:**¹Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Panamá, Ciudad de Panamá, Panamá**Información del artículo:**

Recibido: 02/09/2026

Aceptado: 02/10/2026

Publicado: 12/10/2026

Autor de correspondencia: E-mail: gabriel.montufar@up.ac.pa**Resumen**

Los materiales activados alcalinamente reforzados con fibras constituyen una alternativa para reducir la huella de carbono de la construcción y mejorar el control de fisuras; sin embargo, su desempeño puede modificarse bajo exposiciones térmicas y químicas. Esta revisión tuvo como objetivo sintetizar la evidencia sobre su comportamiento frente a altas temperaturas, ácidos, sulfatos, cloruros y ambientes marinos, e identificar vacíos de validación. Se realizó una revisión sistemática conforme a PRISMA 2020, mediante 11 estrategias de búsqueda en OpenAlex, verificación en Crossref y rastreo de referencias, considerando estudios publicados entre 2005 y 2025. Se incluyeron 30 estudios primarios: 19 sobre exposición térmica y 11 sobre exposición química o ambiental. Los resultados muestran que el desempeño depende de la química del gel, contenido de calcio, humedad, porosidad, estabilidad de la fibra e interfaz fibra-matriz. Las fibras poliméricas pueden aliviar la presión de vapor, pero pierden capacidad de puenteo; el acero conserva actividad mecánica a temperaturas elevadas, con riesgos de oxidación e incompatibilidad térmica; y las fibras minerales y naturales presentan respuestas dependientes de la matriz. Se concluye que no existe un desempeño térmico o químico universal y que se requieren ensayos de exposición acoplada, bajo carga y a escala estructural para sustentar criterios de diseño.

Palabras clave: activación alcalina; ataque químico; degradación; exposición térmica; fibras.

Abstract

Fiber-reinforced alkali-activated materials constitute an alternative for reducing the carbon footprint of construction and improving crack control; however, their performance may change under thermal and chemical exposure. This review aimed to synthesize the evidence on their behavior under high temperatures, acids, sulfates, chlorides, and marine environments, and to identify validation gaps. A systematic review was conducted in accordance with PRISMA 2020, using 11 search strategies in OpenAlex, Crossref verification, and backward reference tracing, considering studies published between 2005 and 2025. Thirty primary studies were included: 19 addressing thermal exposure and 11 addressing chemical or environmental exposure. The results show that performance depends on gel chemistry, calcium content, moisture, porosity, fiber stability, and the fiber-matrix interface. Polymeric fibers may relieve vapor pressure but lose bridging capacity; steel retains mechanical activity at elevated temperatures, with risks of oxidation and thermal incompatibility; and mineral and natural fibers exhibit matrix-dependent responses. It is concluded that there is no universal thermal or chemical performance and that coupled exposure tests, under load and at structural scale, are required to support design criteria.

Keywords: alkali activation; chemical attack; degradation; thermal exposure; fibers.



1. Introducción

La descarbonización del sector de la construcción exige reducir la dependencia del clínker Portland sin comprometer la seguridad, la durabilidad ni el mantenimiento. Los materiales activados alcalinamente (MAA) emplean precursores aluminosilicáticos, entre ellos ceniza volante, escoria granulada de alto horno, metacaolín y diversas combinaciones de subproductos, que reaccionan con soluciones alcalinas para formar redes ligantes diferentes de las generadas durante la hidratación convencional. En términos generales, los sistemas pobres en calcio se asocian con geles N-A-S-H, mientras que las formulaciones ricas en escoria favorecen la formación de geles C-(A)-S-H o C-A-S-H, así como de fases híbridas. Esta distinción es fundamental debido a que influye en propiedades como la retracción, la porosidad, la resistencia inicial, la estabilidad térmica y la susceptibilidad frente a ácidos y sulfatos (Provis, 2018; Bernal y Provis, 2014).

El refuerzo con fibras busca compensar la baja resistencia a tracción y el comportamiento relativamente frágil de muchas matrices activadas alcalinamente. Para ello, se han incorporado fibras de acero, polipropileno, polivinil alcohol (PVA), polietileno, basalto, vidrio, carbono, wollastonita, fibras vegetales y configuraciones híbridas, con el propósito de limitar la apertura de fisuras, transferir tensiones y aumentar la capacidad de absorción de energía. Sin embargo, su efecto no depende únicamente de la resistencia nominal de la fibra. Factores como la longitud, la relación de aspecto, la dispersión, la orientación, la adherencia, la estabilidad en medios alcalinos y el volumen de vacíos inducidos determinan si el refuerzo contribuye al comportamiento resistente o actúa como un defecto. Las revisiones de Ranjbar y Zhang (2020) y Qin et al. (2023) señalan que una dosificación favorable bajo condiciones ordinarias no necesariamente mantiene sus ventajas después de una exposición extrema.

La exposición térmica representa una condición multiescala en la que la transferencia de calor, la migración y la vaporización del agua, la deshidratación del gel y la respuesta de las fibras pueden modificar significativamente el

comportamiento de los materiales activados alcalinamente. En este contexto, es importante distinguir entre la respuesta residual de probetas sometidas a altas temperaturas y el comportamiento frente al fuego de elementos estructurales, ya que ambos representan condiciones de evaluación diferentes. Por ello, la resistencia residual después del enfriamiento constituye una medida necesaria, pero no suficiente, para inferir la resistencia al fuego de un elemento cargado (Rihan et al., 2024; Manzoor et al., 2024).

La exposición química involucra otra familia de mecanismos de degradación. En medios ácidos, el intercambio protónico, la lixiviación de especies alcalinas, la dealuminación y la descalcificación pueden alterar o desintegrar la red ligante; en presencia de ácido sulfúrico, los sistemas ricos en calcio pueden además favorecer la formación de yeso. En soluciones de sulfatos neutros, la respuesta depende de la disponibilidad de calcio, la penetración de especies iónicas y la estabilidad de las fases secundarias. En presencia de cloruros o agua de mar, adquieren importancia la absorción, la conectividad capilar, la fijación química y, cuando existe acero, la estabilidad de la pasividad. Las fibras pueden limitar la fisuración y modificar el transporte de especies, pero no neutralizan por sí solas las reacciones químicas de degradación. Esta distinción entre la función mecánica del refuerzo y los mecanismos químicos de deterioro es fundamental para interpretar resultados aparentemente contradictorios (Bernal y Provis, 2014).

La interacción entre exposición térmica y exposición química es especialmente relevante en túneles, plantas industriales, redes de saneamiento, instalaciones portuarias, almacenes, paneles de protección, estructuras reparadas y elementos prefabricados. Un material puede presentar resistencia frente a un medio ácido mientras permanece sin fisuras, pero perder parte de esta capacidad cuando el calentamiento genera una red conectada de microfisuras que facilita el transporte de especies agresivas. De manera inversa, una exposición previa a sulfatos o cloruros puede modificar el contenido de humedad, la formación de productos secundarios y la adherencia en la interfaz fibra-matriz antes de una posterior



exposición térmica. Por tanto, el problema no consiste simplemente en sumar dos porcentajes de pérdida de propiedades, sino en determinar cómo una exposición modifica los mecanismos de deterioro que gobiernan la respuesta frente a la exposición siguiente.

La literatura ha crecido de forma segmentada. Los estudios térmicos se concentran principalmente en la evaluación de la resistencia residual, la pérdida de masa, los cambios de color, la difracción, la microscopía y la porosidad. Por su parte, los estudios químicos suelen evaluar cambios de masa, expansión, absorción, resistencia y composición después de la inmersión. En los trabajos sobre fibras celulósicas, la atención se centra principalmente en la degradación alcalina, la mineralización y la absorción; en las fibras de acero, en la tenacidad y la corrosión; y en las fibras sintéticas, en la dispersión y la estabilidad térmica. Esta fragmentación dificulta establecer criterios de selección para aplicaciones estructurales y puede conducir a recomendaciones basadas en una sola propiedad.

Una matriz que conserva su resistencia a compresión después de una exposición a 600 °C puede haber experimentado pérdidas de capacidad de deformación, adherencia o integridad superficial. Del mismo modo, un compuesto que presenta una baja pérdida de masa después de una exposición ácida puede experimentar una reducción significativa del módulo o un aumento de la permeabilidad. Por ello, el desempeño frente a exposiciones extremas no puede caracterizarse mediante una única propiedad, sino que requiere considerar aspectos como la integridad, el aislamiento, la capacidad portante, la resistencia residual, la tenacidad, el transporte y la estabilidad química. Asimismo, resulta necesario diferenciar entre la respuesta durante la exposición, la condición inmediatamente posterior y el desempeño después de ciclos de servicio.

En el caso de las fibras poliméricas, la transición térmica puede generar efectos tanto perjudiciales como favorables. La pérdida de capacidad de puenteo reduce la tenacidad, mientras que la fusión o descomposición de algunas fibras puede generar canales que favorezcan la disipación de la presión de vapor y

reduzcan el riesgo de desprendimiento explosivo. En las fibras de acero, la capacidad de puenteo puede mantenerse a temperaturas en las que las fibras poliméricas ya han perdido gran parte de su función mecánica, aunque la oxidación, la reducción de la resistencia del acero y la incompatibilidad entre las dilataciones térmicas de la fibra y la matriz pueden deteriorar la interfaz. En las fibras minerales y carbonosas, la respuesta térmica depende de factores como la atmósfera de exposición, el recubrimiento y la composición del gel.

Para las fibras naturales y la nanocelulosa, la compatibilidad higroscópica representa un factor adicional. Estas fibras pueden contribuir a mejorar la resistencia a flexión y limitar la formación temprana de fisuras, aunque también pueden incrementar la sorptividad, favorecer el transporte de especies ácidas y aumentar la variabilidad del material. La degradación de componentes como la hemicelulosa y la lignina, junto con la hinchazón, la mineralización y las características del tratamiento superficial, condicionan su estabilidad y durabilidad. Liu y Lv (2022) señalan que la evidencia experimental disponible es prometedora, aunque presenta heterogeneidad en el tipo de fibra, los tratamientos previos y los protocolos de envejecimiento.

A partir de esta problemática, la revisión integra los dos ejes de exposición y aborda cuatro preguntas: ¿qué variables de matriz y fibra gobiernan la respuesta termomecánica?; ¿qué mecanismos dominan bajo ácidos, sulfatos, cloruros y agua de mar?; ¿qué evidencia existe sobre exposiciones acopladas o secuenciales?; y ¿qué aplicaciones estructurales cuentan con validación suficiente? El objetivo es sintetizar la evidencia disponible de manera útil para el diseño de materiales y la especificación, en lugar de establecer una clasificación genérica de ligantes. La contribución principal consiste en un marco de relación entre mecanismo, exposición, propiedad y aplicación, orientado a identificar beneficios, compensaciones y vacíos de validación.

2. Metodología

2.1. Diseño de la revisión y estrategia de búsqueda

La revisión siguió las directrices PRISMA 2020 (Page et al., 2021) y la secuencia metodológica propuesta por Tawfik et al. (2019), que comprende la formulación de la pregunta, la definición de los criterios de elegibilidad, la búsqueda, la selección, la extracción, la evaluación y la síntesis de la evidencia. La heterogeneidad entre pastas, morteros, concretos y compuestos continuos, junto con la diversidad de los regímenes térmicos, medios químicos, escalas de ensayo y propiedades evaluadas, justificó una síntesis sistemática cualitativa. No se realizó un metaanálisis debido a la ausencia de un estimando común y de condiciones experimentales suficientemente comparables entre los estudios.

La pregunta de revisión se estructuró en cuatro bloques: material, refuerzo, exposición y resultado. A partir de esta estructura, la búsqueda bibliográfica se realizó en OpenAlex, seleccionada como fuente principal de identificación bibliográfica por su cobertura de producción científica y la disponibilidad de metadatos estructurados sobre artículos, revistas, autores, referencias y citas. Asimismo, permite realizar búsquedas y aplicar filtros sobre los registros recuperados, lo que facilitó la ejecución reproducible de las estrategias definidas y la posterior depuración de los resultados. Su carácter abierto y la disponibilidad de identificadores persistentes, como el DOI, favorecieron su utilización como una fuente accesible y reproducible para esta revisión.

Se ejecutaron 11 estrategias de búsqueda por título mediante la combinación de los conceptos con el operador booleano AND. Las estrategias se orientaron a identificar estudios sobre matrices geopoliméricas o activadas alcalinamente, reforzadas con fibras o materiales compuestos, sometidas a diferentes condiciones térmicas o químicas. La combinación de estos términos permitió delimitar la evidencia de acuerdo con los principales componentes de la pregunta de revisión, como se presenta en la Tabla 1. Se aplicaron los filtros de tipo de documento, restringido a artículos, y fecha de

publicación entre el 1 de enero de 2005 y el 31 de diciembre de 2025. Los operadores se aplicaron como conjunción AND entre conceptos y se consideraron las variantes *fiber* y *fibre* durante la revisión de títulos y metadatos.

Tabla 1
Estrategias de búsqueda empleadas en OpenAlex

Código	Material	Refuerzo o compuesto	Exposición
Q1	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>temperature</i>
Q2	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>fire</i>
Q3	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>acid</i>
Q4	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>sulfate</i>
Q5	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>chloride</i>
Q6	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>seawater</i>
Q7	<i>geopolymer</i>	<i>fiber</i>	<i>aggressive</i>
Q8	<i>alkali-activated</i>	<i>fiber</i>	<i>temperature</i>
Q9	<i>alkali-activated</i>	<i>fiber</i>	<i>acid</i>
Q10	<i>alkali-activated</i>	<i>fiber</i>	<i>sulfate</i>
Q11	<i>geopolymer</i>	<i>composite</i>	<i>high-temperature</i>

2.2. Fuentes de información

La identificación bibliográfica se complementó con Crossref, utilizado para verificar la correspondencia entre los registros recuperados y sus metadatos bibliográficos, particularmente DOI, título, autoría, año de publicación y revista. Esta verificación permitió depurar los registros y confirmar la identidad de los estudios antes de su evaluación e incorporación al conjunto de estudios seleccionados. Crossref no se contabilizó como una fuente adicional de identificación. Además, se realizó un rastreo retrospectivo de las referencias de los estudios seleccionados para localizar investigaciones relevantes que no hubieran sido recuperadas mediante las estrategias de búsqueda por título. Los estudios identificados mediante este procedimiento fueron sometidos a los mismos criterios de elegibilidad aplicados a los registros recuperados en la búsqueda principal.

2.3. Criterios de elegibilidad y clasificación de las exposiciones

Los criterios aplicados para la selección de los estudios se organizaron de acuerdo con las características de la matriz, el refuerzo, la exposición, los resultados y el ámbito de aplicación. Esta organización permitió delimitar



de manera uniforme los estudios con evidencia directamente relacionada con la pregunta de revisión y establecer las condiciones para su inclusión o exclusión, como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2

Criterios de inclusión y exclusión

Criterio	Inclusión	Exclusión
Material	Matrices activadas alcalinamente o geopoliméricas	Cerámicas sin relación con la construcción
Refuerzo	Materiales reforzados con fibras o controles con valor mecánico	Estudios sin relación con el efecto de la fibra o la matriz
Exposición	Exposición térmica o química	Estudios sin exposición relevante para la pregunta de revisión
Resultados	Al menos un resultado cuantificable mecánico, físico o microestructural	Registros sin información suficiente sobre la mezcla o la exposición
Aplicación	Materiales o componentes relacionados con la construcción	Sistemas fuera del ámbito de la construcción
Tipo de estudio	Estudios experimentales primarios	Revisiones, duplicados y simulaciones sin validación material

Los controles sin fibras se conservaron únicamente cuando permitían aislar el efecto de la química de la matriz o establecer una referencia para interpretar el comportamiento del refuerzo. Estos estudios fueron identificados como controles en la matriz de extracción. Para la clasificación de la exposición térmica se distinguió entre altas temperaturas, incendio y resistencia al fuego. Se consideró exposición a altas temperaturas a los ensayos en horno con evaluación posterior al enfriamiento; incendio, a los estudios que emplearon una curva térmica o un flujo de calor representativo; y resistencia al fuego, únicamente a las evaluaciones de elementos cargados mediante criterios de capacidad portante, integridad o aislamiento.

Esta diferenciación permitió evitar la equivalencia entre resistencia residual de probetas y desempeño frente al fuego de elementos estructurales.

Mientras que, para la exposición química se diferenciaron los medios ácidos, sulfatos, cloruros y agua de mar. Cuando fueron reportados, se registraron el agente de exposición, la concentración, la temperatura, la duración, la renovación del medio y el número de ciclos. Estas variables permitieron interpretar los resultados de acuerdo con las condiciones específicas de exposición y evitar comparaciones directas entre protocolos no equivalentes.

2.4. Selección y extracción de datos

La deduplicación se realizó mediante DOI normalizado. Cuando el DOI no estaba disponible, se compararon el título normalizado y el año de publicación. Las 11 estrategias de búsqueda recuperaron 177 registros. Después de eliminar 13 duplicados, se obtuvieron 164 registros únicos para el cribado. Se excluyeron 142 registros mediante la evaluación de títulos y metadatos. Los 22 informes restantes cumplieron los criterios de elegibilidad y se incorporaron ocho estudios adicionales mediante rastreo retrospectivo y verificación de DOI. Los estudios incluidos quedaron conformados por 30 investigaciones experimentales primarios. El proceso de identificación, depuración y selección de los registros permite visualizar la reducción progresiva del conjunto inicial hasta los estudios que cumplieron los criterios de elegibilidad, como se muestra en la Figura 1.

La extracción de datos comprendió variables relacionadas con la composición de la matriz, las características del refuerzo, las condiciones iniciales, la exposición, la escala de evaluación, las propiedades medidas y la caracterización microestructural. Estas variables se agruparon en categorías que permiten registrar de manera homogénea las características de los materiales, las condiciones de exposición y las respuestas evaluadas, como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3

Variables consideradas en la extracción de datos

Categoría	Variables extraídas
Matriz	Precursor, contenido de calcio, activador y agregado
Refuerzo	Familia de fibra, tipo y dosificación
Geometría y escala	Geometría de la probeta o componente y escala de evaluación
Condición inicial	Curado y humedad previa
Exposición térmica	Temperatura máxima, permanencia, calentamiento y enfriamiento
Exposición química	Agente químico, concentración, duración y ciclos
Propiedades	Variables mecánicas, físicas y otras propiedades reportadas
Microestructura	Técnicas de caracterización y cambios microestructurales

2.5. Evaluación de la calidad de la evidencia

La calidad metodológica de los estudios se valoró mediante seis dominios: reproducibilidad de la mezcla, caracterización del refuerzo, definición de la condición inicial, definición de la exposición, presencia de referencia o control y correspondencia entre los resultados, la caracterización microestructural y las conclusiones. Estos dominios permitieron valorar de manera estructurada la suficiencia de la información experimental y la correspondencia entre las condiciones estudiadas, los resultados obtenidos y las interpretaciones formuladas, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4
evaluación de la calidad de la evidencia

Dominio	Aspecto evaluado
Mezcla	Información suficiente para caracterizar la formulación
Refuerzo	Caracterización y dosificación de la fibra
Condición inicial	Estado del material antes de la exposición
Exposición	Definición de las condiciones térmicas o químicas
Referencia o control	Presencia y utilidad de controles o referencias
Correspondencia de la evidencia	Coherencia entre resultados, microestructura y conclusiones

La evaluación se utilizó para interpretar la solidez y las limitaciones de la evidencia, sin establecer una puntuación global de los estudios. La síntesis se desarrolló en tres niveles: comparación de los resultados según el intervalo térmico o el medio químico; reconstrucción de los mecanismos asociados con el transporte de humedad, la deshidratación, la sinterización, la incompatibilidad térmica, la fusión, la oxidación, la lixiviación y la precipitación; y vinculación de estos mecanismos con propiedades y funciones relevantes para la aplicación, como la capacidad portante, la tenacidad residual, la adherencia, la estanqueidad y la mantenibilidad.

En la síntesis se diferenciaron los hallazgos reportados directamente por los estudios de las interpretaciones desarrolladas en esta revisión. Las afirmaciones cuantitativas se mantuvieron únicamente cuando los estudios proporcionaron información suficiente sobre las condiciones experimentales, y ningún valor correspondiente a una formulación particular se generalizó como un umbral universal.

3. Resultados

3.1. Perfil de los estudios incluidos

Se incluyeron 30 estudios experimentales publicados entre 2005 y 2025, de los cuales 19 correspondieron a exposición térmica y 11 a exposición química o ambiental. Predominaron sistemas basados en ceniza volante, metacaolín y escoria, evaluados principalmente en pastas, morteros y concretos. Fueron menos frecuentes los compuestos continuos, los especímenes con geometría representativa y los ensayos de elemento. En consecuencia, la evidencia disponible sustenta con mayor fuerza la respuesta residual de los materiales que el desempeño de elementos durante un incendio o bajo carga.

Las fibras más estudiadas fueron PVA, acero, basalto y refuerzos minerales. El polipropileno y el polietileno aparecieron principalmente en configuraciones híbridas o compuestos diseñados para funciones específicas. Las fibras naturales estuvieron representadas por bambú, coco y nanofibras de celulosa. El carbono se evaluó principalmente en compuestos continuos con orientación



controlada y sometidos a tratamientos térmicos elevados, por lo que sus resultados no son directamente comparables con los de concretos reforzados con fibras cortas. La heterogeneidad de las geometrías, las dosificaciones y las configuraciones de refuerzo impide establecer

una dosificación óptima de aplicación general. La distribución de las matrices, los refuerzos, las condiciones de exposición y las principales variables de respuesta de los estudios incluidos se resume en la Tabla 5.

Figura 1

Flujo de selección conforme a PRISMA 2020

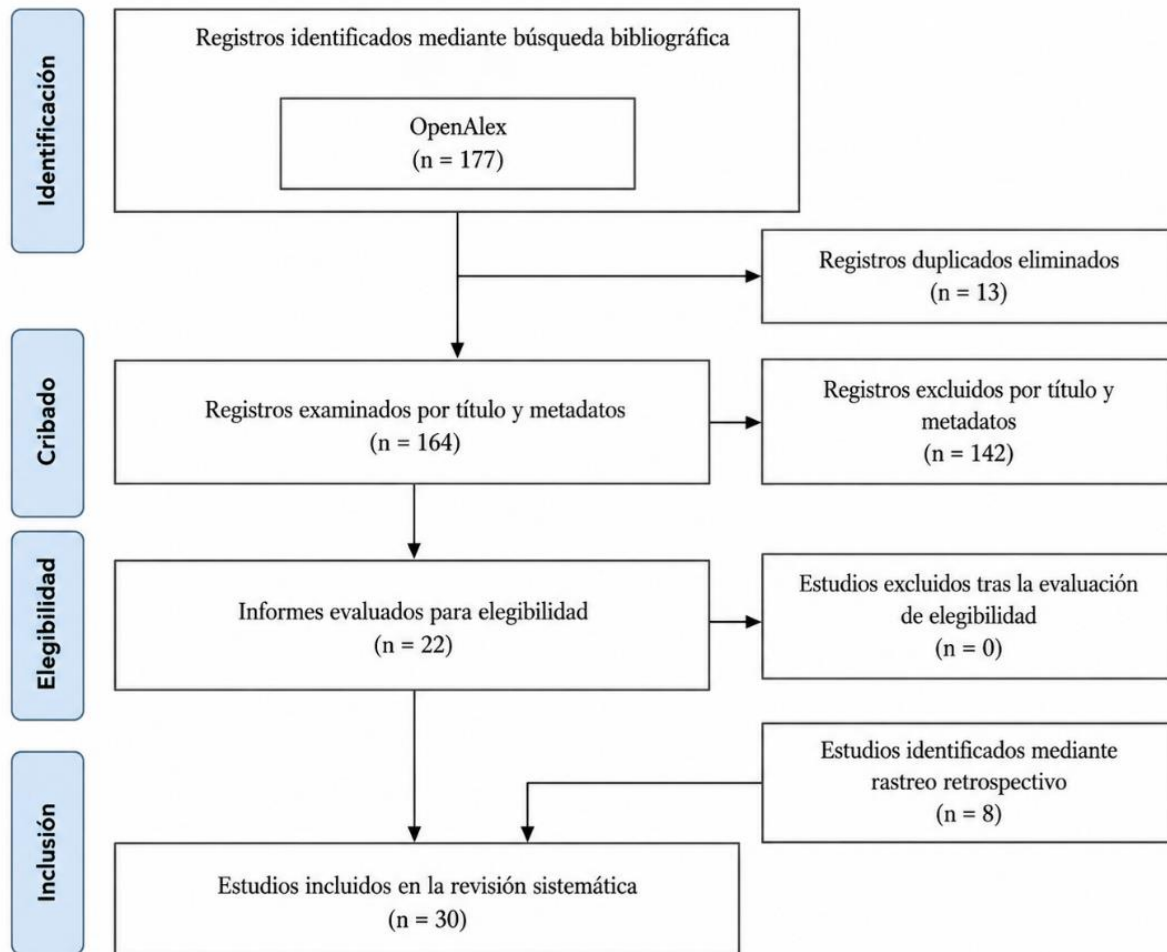


Tabla 5

Características de los 30 estudios experimentales incluidos

ID	Estudio	Matriz	Fibra	Exposición	Resultados	Función
1	Bakharev (2005a)	geopolímero	sin fibra (control)	ácidos	masa, resistencia y fases	mecanismo químico
2	Bakharev (2005b)	ceniza volante activada	sin fibra (control)	sulfatos	resistencia y productos	efecto del activador
3	Bakharev (2006)	ceniza volante activada	sin fibra (control)	temperatura elevada	resistencia, poros y fisuración	mecanismo térmico

Tabla 5 (Continuación/1)

ID	Estudio	Matriz	Fibra	Exposición	Resultados	Función
4	Çelik et al. (2018)	metacaolín + boro	sintéticas/PVA	temperatura elevada	flexión, tenacidad, microestructura	fibra sintética
5	Farhan et al. (2022)	GGBFS activada	acero	ambientes agresivos/temperatura	compresión, flexión, integridad	acero y exposición múltiple
6	Guo et al. (2020)	metacaolín	PVA, PP, wollastonita	sulfatos	resistencia, poros, fisuración	hibridación
7	He et al. (2010)	geopolímero	carbono unidireccional	tratamiento térmico alto	mecánica y fases	límite de extrapolación
8	Kadhim et al. (2022)	escoria + agregado ligero	PVA	temperatura elevada	mecánica y microestructura	interacción fibra-agregado
9	Kan et al. (2025)	compuesto geopolimérico	polimérica	temperatura elevada	resistencia y fisuración	componentes clave
10	Kong y Sanjayan (2010)	geopolímero	sin fibra (control)	temperatura elevada	pasta/mortero/concreto	escala y agregado
11	Lezzerini et al. (2024)	metacaolín	coco	ácidos	flexión, absorción, capilaridad	fibra natural y transporte
12	Luo et al. (2023)	metacaolín	nanocelulosa + wollastonita	sulfatos	mecánica, poros, microestructura	refuerzo multiescala
13	Martin et al. (2015)	aluminosilicatos activados	sin fibra (control)	temperatura elevada	mecánica y transformaciones	matriz pobre en calcio
14	Raza et al. (2024)	escoria/ceniza ligera	polietileno	sulfatos	resistencia, absorción, masa	matriz/fibra
15	Ren et al. (2017)	metacaolín	wollastonita, tremolita, basalto	sulfatos/cloruros	resistencia y poros	mineral híbrido
16	Rivera et al. (2016)	ligantes activados	sin fibra (control)	calentamiento rápido	daño, resistencia y fases	comparación Portland
17	Sá Ribeiro et al. (2021)	metacaolín	bambú	H ₂ SO ₄ /HCl	masa, capilaridad, mecánica	fibra natural en ácidos
18	Samal (2019)	geopolímero	carbono, vidrio E, basalto	temperatura elevada	microestructura	comparación de fibras
19	Sarker et al. (2014)	ceniza volante	sin fibra (control)	fuego/temperatura	spalling, fisuración, resistencia	respuesta residual



Tabla 5 (Continuación/2)

ID	Estudio	Matriz	Fibra	Exposición	Resultados	Función
20	Tanyildizi y Yonar (2016)	concreto geopolimérico	PVA	temperatura elevada	mecánica residual	PVA
21	Zhang et al. (2022)	metacaolín/ceniza	PVA	temperatura elevada	compresión, flexión, microestructura	ventana térmica
22	Ziada et al. (2021)	ceniza + polvo de basalto	basalto	temperatura elevada	mecánica y microestructura	basalto térmico
23	Ibraheem et al. (2021)	geopolímero + polvo de cantera	acero	temperatura elevada	mecánica residual/microestructura	acero y residuo
24	Chindaprasirt et al. (2021)	ceniza alta en calcio	polipropileno	temperatura elevada	residuales y microestructura	PP y porosidad
25	Vijaya Prasad et al. (2023)	concreto geopolimérico	fibras	temperatura elevada	adherencia y microestructura	interfaz térmica
26	Sukontasukkul et al. (2023)	geopolímero autocompactante	acero	ácido/cloruros	mecánica, tenacidad, penetración	durabilidad química
27	Korniejenko et al. (2022)	geopolímero	fibras largas	temperaturas de operación	fractura y mecánica	Fractura/temperatura
28	Kaya y Köksal (2021)	ceniza volante	PVA	temperatura elevada	mecánica residual	PVA térmico
29	Bian et al. (2024)	concreto geopolimérico	basalto	hielo-deshielo + sulfato	mecánica y durabilidad	exposición acoplada
30	Cheng et al. (2024)	ceniza + vidrio residual	bambú	temperatura elevada	físico-mecánica/térmica	bambú y vidrio

3.2. Química de la matriz y respuesta térmica

Los resultados muestran que el contenido de calcio reorganiza la secuencia de los mecanismos de daño durante la exposición térmica. En las matrices pobres en calcio, la red aluminosilicática puede experimentar procesos de deshidratación y posterior sinterización, acompañados de una densificación local a temperaturas intermedias y altas. En las matrices con mayor contenido de calcio, particularmente aquellas basadas en escoria, la resistencia inicial suele ser mayor; sin embargo, la deshidratación de los geles cálcicos, la contracción y las diferencias de deformación

con los agregados pueden favorecer la formación de fisuras. Provis (2018) señala que las categorías N-A-S-H y C-(A)-S-H constituyen simplificaciones de sistemas de geles más complejos, ya que las formulaciones híbridas pueden presentar geles coexistentes. Por ello, la respuesta térmica debe interpretarse considerando conjuntamente la composición de la matriz y las condiciones de curado.

Entre temperatura ambiente y aproximadamente 200 a 300 °C, algunos sistemas presentan estabilidad o incluso incrementos de resistencia. El calentamiento puede favorecer la eliminación de agua libre, la

continuación de reacciones incompletas y determinados procesos de densificación de la microestructura. Sin embargo, este comportamiento inicial no puede interpretarse como evidencia de resistencia sostenida frente al fuego, debido a que puede coexistir con pérdida de masa, modificaciones del módulo y acumulación de daño que se manifiestan a temperaturas superiores. Kong y Sanjayan (2010) demostraron que la respuesta difiere entre pasta, mortero y concreto, debido a que la incorporación de agregados modifica las restricciones internas y la compatibilidad de deformaciones durante el calentamiento.

Bakharev (2006) mostró que la estabilidad térmica no es una característica inherente a todos los geopolímeros. En sistemas de ceniza volante activados con sodio, el calentamiento hasta 800 °C produjo modificaciones de la porosidad y fisuración asociada con la contracción. La naturaleza del activador y los productos formados antes de la exposición condicionaron la evolución del material. Este resultado evidencia que la respuesta térmica depende de la formulación específica y no puede atribuirse únicamente al carácter activado alcalinamente de la matriz.

Rivera et al. (2016) compararon ligantes activados y materiales Portland sometidos a calentamiento rápido hasta 650 °C. El sistema basado en ceniza volante activada presentó menor daño visual que el material Portland utilizado como referencia, que mostró una degradación más pronunciada. Esta diferencia se relacionó con las fases presentes y con el transporte de humedad. No obstante, la comparación estuvo condicionada por el régimen de calentamiento y por las características de las formulaciones evaluadas, por lo que sus resultados no deben extrapolarse directamente a otros sistemas, especialmente a matrices con mayor contenido de escoria o a elementos estructurales sometidos a carga.

Martin et al. (2015) observaron que algunos aluminosilicatos activados con bajo contenido de calcio conservaron o incrementaron su resistencia hasta aproximadamente 600 °C y presentaron una respuesta menos frágil a temperaturas elevadas. La densificación y las transformaciones de fase

contribuyeron a esta tendencia. Sin embargo, el comportamiento puede modificarse cuando la contracción térmica está restringida, cuando los agregados presentan deformaciones incompatibles o cuando el enfriamiento genera un choque térmico. En consecuencia, la escala de evaluación influye en la interpretación de la respuesta térmica y no constituye únicamente una característica del procedimiento experimental.

Sarker et al. (2014) evaluaron concreto geopolimérico basado en ceniza volante después de una exposición de hasta 1000 °C. No observaron desprendimiento explosivo y registraron menor fisuración que en el concreto Portland de referencia, aunque la resistencia residual disminuyó. La incompatibilidad entre la pasta y el agregado se identificó como uno de los mecanismos asociados con el deterioro. Estos resultados permiten diferenciar dos aspectos del comportamiento frente al fuego: la ausencia de desprendimiento explosivo no implica conservación de la capacidad mecánica, y una superficie aparentemente íntegra puede coexistir con pérdidas internas de rigidez o adherencia.

3.3. Fibras poliméricas bajo incendio

El PVA es el refuerzo polimérico con evidencia térmica más consistente. A temperatura ambiente, contribuye al puenteo de fisuras y al incremento de la tenacidad debido a su capacidad de adherencia hidrófila con la matriz. Tanyildizi y Yonar (2016) observaron mejoras iniciales de las propiedades mecánicas en concreto geopolimérico reforzado con PVA, seguidas de una disminución progresiva al incrementar la temperatura de 20 a 800 °C. A medida que la fibra se degrada térmicamente, disminuye su capacidad de actuar como refuerzo; los vacíos generados tras su degradación pueden contribuir al alivio de la presión interna, pero también reducen la sección resistente y favorecen la conectividad de los poros.

Çelik et al. (2018) estudiaron compuestos de metacaolín con residuo de boro y fibras sintéticas. En la formulación evaluada, el PVA produjo un incremento de aproximadamente 415,58 % en la tenacidad a flexión a temperatura ambiente y contribuyó a una mayor tolerancia al



daño durante la exposición térmica. Sin embargo, esta magnitud corresponde a las condiciones específicas del estudio y no puede considerarse un factor general de incremento. El resultado evidencia, además, que la evolución de la tenacidad puede diferir de la respuesta de la resistencia a compresión.

Zhang et al. (2022) reportaron que, a 200 °C, el PVA incrementó en su sistema las resistencias cúbica, prismática y a flexión en 50,5 %, 29,4 % y 66,3 %, respectivamente. Por encima de 200 °C, la degradación de la fibra estuvo acompañada por una disminución de las propiedades hasta 800 °C. Este comportamiento evidencia una ventana térmica en la que la fibra puede contribuir al refuerzo mientras se producen cambios favorables en la matriz, pero posteriormente pierde su función y deja vacíos en la estructura. Por ello, el comportamiento observado a temperaturas intermedias no debe utilizarse para representar el desempeño de la fibra durante un incendio desarrollado.

Kadhim et al. (2022) evaluaron morteros de escoria reforzados con PVA y agregado ligero artificial. A 250 °C se observaron mejoras asociadas con reacciones adicionales y modificaciones microestructurales, mientras que a 500 °C las propiedades disminuyeron y el compuesto reforzado con PVA presentó una respuesta más frágil. La presencia del agregado ligero modificó la transferencia de calor y las deformaciones del material, por lo que el comportamiento observado no puede atribuirse exclusivamente a la fibra. Este resultado evidencia la necesidad de considerar conjuntamente la matriz, el agregado y el refuerzo al interpretar la respuesta térmica.

Las fibras de polipropileno y polietileno presentan temperaturas de fusión inferiores a las del acero y de las fibras minerales. En concretos Portland, su incorporación se ha asociado con la generación de vías de alivio para la presión de vapor; en materiales activados alcalinamente, este mecanismo puede ser relevante, aunque su efecto depende de la porosidad inicial y de la distribución de humedad de la matriz. La formación de canales después de la degradación de la fibra puede contribuir a reducir la presión interna y, al mismo tiempo, aumentar la conectividad de los poros, lo que podría

favorecer el ingreso de agentes agresivos después de la exposición térmica. Por ello, la dosificación debe analizarse considerando simultáneamente el alivio de presión, la tenacidad residual y la permeabilidad posterior a la exposición.

En los compuestos híbridos, una fibra polimérica puede contribuir al alivio de la presión interna, mientras que otro refuerzo con mayor estabilidad térmica puede mantener parcialmente la capacidad de puenteo de fisuras. La evidencia de Guo et al. (2020), aunque corresponde a exposición a sulfatos, muestra que la combinación de PVA, polipropileno y refuerzo mineral modifica la porosidad y la fisuración. Para condiciones de incendio, este enfoque requiere mayor validación experimental, particularmente mediante ensayos que evalúen de manera conjunta la presión interna, la pérdida de masa, la apertura de fisuras y la respuesta mecánica bajo carga.

3.4. Fibras poliméricas bajo incendio

Las fibras de acero pueden contribuir al incremento de la resistencia a flexión, la tenacidad y la capacidad residual, debido a que mantienen su integridad a temperaturas superiores a las que soportan las fibras poliméricas. No obstante, el acero pierde módulo y resistencia con el aumento de la temperatura, puede experimentar oxidación en presencia de oxígeno y presentar pérdida de adherencia con la matriz debido a las diferencias de deformación térmica. Farhan et al. (2022) observaron mejoras en la resistencia y el comportamiento de sistemas basados en escoria reforzados con fibras de acero bajo ambientes agresivos, aunque sus resultados también mostraron que el efecto del refuerzo depende de la densidad de la matriz y del control de fisuras. La corrosión de las fibras próximas a la superficie constituye, además, un factor que debe considerarse durante la vida útil del material.

Kan et al. (2025) analizaron componentes específicos de un compuesto geopolimérico sometido a altas temperaturas. Las formulaciones con más de 50 % de escoria conservaron resistencias superiores a 20 MPa a 800 °C. Asimismo, una relación arena/ligante de

0,6 alcanzó aproximadamente 36 MPa después de la exposición a 800 °C y presentó un incremento cercano al 7 % a 600 °C. No se observó spalling, aunque las mezclas con mayor contenido de calcio desarrollaron mayor fisuración. Estos resultados corresponden a las formulaciones y condiciones experimentales estudiadas, pero muestran la necesidad de analizar conjuntamente la resistencia residual, la fisuración y el contenido de calcio.

Las fibras de basalto y vidrio presentan una mayor estabilidad térmica que las fibras poliméricas, aunque pueden experimentar ataque alcalino, alteraciones superficiales y pérdida de adherencia con la matriz. Su estabilidad geométrica y baja densidad constituyen características favorables; sin embargo, la permanencia física de la fibra no garantiza que la interfaz conserve su capacidad de transferencia de tensiones. En exposición química, el recubrimiento, la composición del vidrio y la composición de la solución de poro son variables relevantes. Por ello, los ensayos de extracción y las evaluaciones de flexión residual pueden proporcionar información complementaria a la resistencia a compresión para caracterizar el comportamiento del refuerzo.

Los refuerzos minerales aciculares, como la wollastonita y la tremolita, presentan características intermedias entre un refuerzo fibroso y un microrelleno. Pueden contribuir a la desviación de fisuras, modificar el empaquetamiento y afectar los procesos de nucleación del gel. Ren et al. (2017) identificaron una combinación de 5 % de wollastonita, 5 % de tremolita y 2 % de fibra de basalto con buen comportamiento dentro de las condiciones experimentales evaluadas frente a sulfatos y cloruros. Después de la exposición a sulfatos, el tamaño de poro característico aumentó aproximadamente de 22 a 92 nm y la resistencia disminuyó con el incremento de la concentración y del tiempo de exposición. Esta evolución relaciona el deterioro químico con modificaciones de la estructura porosa.

El carbono presenta elevada resistencia específica y estabilidad térmica en condiciones sin oxidación, pero su comportamiento puede verse afectado en atmósferas con oxígeno a

temperaturas elevadas. Samal (2019) comparó compuestos geopoliméricos reforzados con carbono, vidrio E y basalto, y observó diferencias en su evolución microestructural. Los resultados obtenidos con fibras continuas no deben extrapolarse directamente a sistemas con fibras cortas dispersas, debido a las diferencias en orientación, fracción volumétrica y mecanismo de transferencia de carga.

He et al. (2010) sometieron compuestos unidireccionales reforzados con fibra de carbono a tratamientos térmicos entre 1100 y 1300 °C. El mejor comportamiento se observó alrededor de 1100 °C, asociado con procesos de densificación y formación de leucita, seguido de un deterioro a temperaturas superiores. Este régimen experimental corresponde a un compuesto refractario sometido a tratamiento térmico y no a un elemento de concreto expuesto a un incendio. Su relevancia para esta revisión es principalmente mecánica, ya que evidencia que la fibra puede conservar parte de su integridad mientras la matriz experimenta transformaciones, aunque el resultado depende de la atmósfera, la interfaz y el tratamiento previo.

Los estudios añadidos ampliaron la cobertura térmica. Ziada et al. (2021) evaluaron basalto en morteros de ceniza volante y polvo de basalto; Ibraheem et al. (2021), concreto geopolimérico con polvo de cantera y fibras de acero; Chindaprasirt et al. (2021), polipropileno en una matriz de ceniza volante con alto contenido de calcio; Vijaya Prasad et al. (2023), la adherencia residual y la microestructura; Korniejenko et al. (2022), la fractura de materiales con fibras largas; Kaya y Köksal (2021), el comportamiento térmico de sistemas con PVA; y Cheng et al. (2024), sistemas con vidrio residual y bambú. Estos estudios muestran respuestas dependientes de la composición de la matriz, el tipo de fibra y el intervalo térmico evaluado. La evidencia disponible refuerza la necesidad de reportar la respuesta de la interfaz y las propiedades residuales, además de la resistencia a compresión, sin establecer un factor de reducción único aplicable a todos los sistemas.

3.5. Ataque ácido

Bakharev (2005a) demostró que los materiales geopoliméricos pueden presentar mayor



resistencia al ataque ácido que el concreto Portland de referencia, aunque el comportamiento mostró una fuerte dependencia del activador empleado. La degradación incluyó intercambio iónico, pérdida de aluminio y reordenamiento hacia fases zeolíticas. La resistencia del material frente al ataque ácido no puede explicarse únicamente por su menor contenido de calcio, debido a que la estructura del gel y las características del transporte también condicionan la evolución del deterioro. Un sistema compacto puede conservar parte de su masa y, simultáneamente, experimentar pérdida de cohesión interna.

En matrices con mayor contenido de calcio, el ácido sulfúrico combina el ataque ácido con la presencia de sulfatos y puede favorecer la formación de yeso. La precipitación de productos puede obstruir temporalmente los poros y reducir la pérdida de masa, pero también generar tensiones internas, ablandamiento o desprendimiento posterior. Por ello, la pérdida de masa no debe utilizarse como único indicador de deterioro. La evaluación requiere considerar propiedades mecánicas, módulo, profundidad de la zona alterada y composición de los productos formados y, en aplicaciones hidráulicas, permeabilidad o absorción después de la exposición.

Sá Ribeiro et al. (2021) estudiaron compuestos de metacaolín reforzados con fibra de bambú en soluciones de ácido sulfúrico y ácido clorhídrico de hasta 15 % durante periodos de hasta 112 días. La fibra no proporcionó una protección general frente al ataque ácido y, bajo determinadas condiciones, se observó un incremento de la pérdida de masa o de la capilaridad. Este comportamiento puede relacionarse con el transporte a través de la interfaz entre la fibra y la matriz y con la degradación del refuerzo orgánico. Por tanto, una mejora inicial de las propiedades mecánicas mediante fibras vegetales no garantiza una mayor resistencia química a largo plazo.

Lezzerini et al. (2024) observaron que la incorporación de fibras de coco incrementó la resistencia a flexión de geopolímeros de metacaolín, pero también favoreció el ingreso de agua y la absorción capilar. La degradación fue menor en ácido cítrico y más pronunciada en HCl

y H_2SO_4 . Estos resultados muestran que el ataque ácido no constituye una condición de exposición única, debido a que el anión, el pH, la capacidad de complejación, la renovación de la solución y la solubilidad de los productos formados pueden modificar los mecanismos de deterioro.

La interfaz entre fibra y matriz puede adquirir especial importancia cuando existen deficiencias de dispersión, hinchamiento del refuerzo o pérdida de adherencia. En fibras naturales, el tratamiento alcalino puede modificar la rugosidad superficial y favorecer la adherencia, pero también puede remover componentes de la fibra y aumentar la variabilidad de sus propiedades. Para elementos expuestos a efluentes, la selección del refuerzo debería considerar su estabilidad dimensional, condición de humedad inicial, orientación y protección superficial. En recubrimientos delgados, la elevada relación entre el área expuesta y el volumen del material puede intensificar el transporte de agentes agresivos, de modo que una mejora de la resistencia a flexión no necesariamente se traduce en una mayor durabilidad química.

3.6. Sulfatos, cloruros y agua de mar

Bakharev (2005b) mostró que la resistencia frente a sulfatos depende del activador empleado. El sistema activado con hidróxido de sodio presentó el mejor comportamiento dentro de las condiciones evaluadas, mientras que determinadas combinaciones alcalinas experimentaron reducciones de resistencia de hasta 65 % después de la exposición a sulfato de sodio. Estos resultados muestran que un mismo precursor puede desarrollar redes con diferente comportamiento frente a sulfatos en función del sistema de activación. Por ello, la descripción de una matriz como “ceniza volante activada” resulta insuficiente y debe complementarse con información sobre la concentración del activador, el módulo de silicato, las condiciones de curado y las fases formadas.

Guo et al. (2020) evaluaron compuestos de metacaolín reforzados con diferentes combinaciones de fibras. Las configuraciones con 1 % de polipropileno y 1 % de PVA, así como aquellas con 2 % de PVA y 15 % de wollastonita,

presentaron el mejor equilibrio dentro del programa experimental. La exposición a sulfatos incrementó el tamaño y el volumen de los poros y redujo las propiedades evaluadas. Las fibras contribuyeron al control de la propagación de fisuras, pero no evitaron las modificaciones de la matriz. Por tanto, el efecto observado debe interpretarse como una mayor tolerancia al daño y no como una resistencia frente al ataque químico.

Farhan et al. (2022) examinaron compuestos de escoria reforzados con fibras de acero bajo exposición a sulfatos, agua de mar, ciclos de hielo y deshielo y temperatura elevada. El refuerzo de acero incrementó la resistencia a compresión y flexión y contribuyó al mantenimiento de la integridad del material, particularmente en matrices de mayor densidad. Sin embargo, la combinación de diferentes condiciones de exposición dificulta la separación de los mecanismos individuales de deterioro. Para aplicaciones en ambientes marinos, sería conveniente complementar estas evaluaciones con técnicas electroquímicas y con la caracterización del estado de las fibras próximas a la superficie.

Ren et al. (2017) mostraron que la combinación de wollastonita, tremolita y basalto puede contribuir a reducir el deterioro bajo las condiciones experimentales estudiadas; sin embargo, la resistencia disminuyó con el incremento de la concentración y del tiempo de exposición. La evolución de la estructura porosa contribuyó a explicar esta pérdida de resistencia. En presencia de cloruros, la ausencia de expansión visible no permite descartar una penetración significativa, por lo que deben diferenciarse los procesos de fijación de cloruros y las características de la tortuosidad del material. En matrices reforzadas con acero, la concentración de cloruros y la química de la solución de poro son variables relevantes para evaluar el riesgo de corrosión del refuerzo.

Luo et al. (2023) reforzaron un geopolímero de metacaolín con 2 % de nanofibras de celulosa y 10 % de wollastonita. Frente al control, reportaron incrementos aproximados de 76,1 % en compresión y 135,5 % en flexión, junto con una mejora de la resistencia frente a sulfatos. La combinación de refuerzos

actuó a diferentes escalas mediante mecanismos asociados con la nucleación y el refinamiento de la estructura, el control de microfisuras y el puenteo proporcionado por el refuerzo mineral. Estos porcentajes corresponden a una formulación específica y no deben generalizarse a otras composiciones; sin embargo, el estudio aporta evidencia sobre el potencial del refuerzo multiescala.

Raza et al. (2024) estudiaron compuestos geopoliméricos ligeros reforzados con polietileno y expuestos a 5 % de Na_2SO_4 durante 90 y 180 días. Los sistemas con 100 % de escoria presentaron mayores resistencias residuales y menores valores de absorción y pérdida de masa que las mezclas con mayor proporción de ceniza volante. Este resultado muestra que el comportamiento frente a sulfatos no depende exclusivamente del contenido de calcio, sino también de la densidad de la matriz y de las condiciones que controlan el transporte. Además, no debe extrapolarse directamente a la exposición a ácido sulfúrico, donde intervienen mecanismos químicos adicionales asociados con la acidez del medio.

Sukontasukkul et al. (2023) estudiaron un geopolímero autocompactante reforzado con 0,5 a 1,5 % de fibras de acero y expuesto a ácido y cloruros. Los autores reportaron mejoras en las propiedades mecánicas y la tenacidad, además de una menor penetración de cloruros dentro de las formulaciones evaluadas. Bian et al. (2024) evaluaron concreto geopolimérico reforzado con basalto bajo ciclos de hielo y deshielo combinados con erosión por sulfatos. Estos estudios amplían la evidencia sobre condiciones de exposición combinadas; sin embargo, el acoplamiento entre hielo, deshielo y sulfatos corresponde a un mecanismo de deterioro diferente de la exposición térmica asociada con un incendio.

El agua de mar constituye una condición de exposición compleja debido a la presencia simultánea de cloruros, sulfatos y magnesio, además de ciclos de humectación y secado. En ambientes con temperaturas elevadas, estas condiciones pueden combinarse con efectos térmicos adicionales. Los ensayos de inmersión continua no reproducen necesariamente los procesos asociados con la cristalización de sales,



los gradientes de concentración y los ciclos de humectación y secado. En materiales reforzados con fibras, el control de fisuras puede modificar el transporte de agentes agresivos, mientras que las interfaces entre los distintos componentes pueden introducir zonas de mayor heterogeneidad. Por ello, la evaluación de estos sistemas debería considerar absorción capilar, difusión o migración de cloruros, propiedades residuales, caracterización de la interfaz y, cuando corresponda, el estado de corrosión de las fibras metálicas.

3.7. Exposiciones acopladas y aplicaciones estructurales

La evidencia directa sobre secuencias de exposición combinada, como incendio seguido de ataque ácido, sulfatos seguido de incendio o cloruros seguido de incendio, fue limitada entre los estudios incluidos. La mayoría de las investigaciones evaluó una condición de exposición individual y caracterizó posteriormente el material. Esta ausencia de evidencia experimental impide cuantificar las interacciones entre mecanismos; sin embargo, los resultados disponibles permiten identificar posibles efectos combinados. El calentamiento puede generar fisuras y modificar la conectividad de los poros como consecuencia de la pérdida de fibras poliméricas, lo que podría facilitar posteriormente el transporte de agentes químicos. De manera similar, una exposición previa a medios salinos puede modificar el contenido de humedad y favorecer la acumulación de sales, mientras que un calentamiento posterior puede alterar la presión de vapor y las transformaciones de la matriz.

La interacción entre exposiciones también puede presentar efectos de naturaleza diferente. La precipitación de productos en la superficie puede reducir temporalmente la permeabilidad, mientras que un calentamiento moderado puede favorecer la continuación de determinadas reacciones y procesos de densificación. Estos efectos, sin embargo, pueden modificarse durante exposiciones sucesivas o cíclicas. Por ello, la resistencia obtenida frente a exposiciones individuales no debe combinarse directamente para estimar el comportamiento frente a una secuencia de

exposiciones. Un material evaluado por separado a 600 °C y frente a sulfatos no puede considerarse automáticamente validado para una exposición consecutiva a sulfatos y posteriormente a incendio. La evaluación de estas condiciones requiere diseños experimentales factoriales y modelos capaces de representar el daño acumulado.

Entre las aplicaciones con mayor evidencia experimental se encuentran los paneles no portantes, las barreras, los revestimientos de túneles, los morteros de reparación, los componentes prefabricados, los canales y determinados elementos industriales. En estas aplicaciones pueden aprovecharse características como la baja conductividad térmica, la resistencia frente a determinados medios químicos o la capacidad de control de fisuras sin depender exclusivamente de la conservación de la capacidad portante durante una exposición extrema. La evidencia disponible es más limitada para vigas, losas, columnas y conexiones sometidas a incendio, debido a la escasez de ensayos bajo carga y de evaluaciones sobre adherencia con el refuerzo convencional, anclaje de fibras, compatibilidad entre juntas y control de deformaciones.

Los compuestos reforzados con fibras poliméricas pueden contribuir al control de fisuras y deformaciones, pero su utilización frente a incendio requiere considerar la pérdida progresiva de la capacidad de puenteo a medida que aumenta la temperatura. Los refuerzos híbridos de acero y polímero, o de materiales minerales y polímeros, podrían combinar funciones complementarias de control de fisuras, tenacidad y alivio de presión; sin embargo, todavía se requiere evidencia experimental sobre su dispersión, trabajabilidad y reproducibilidad a escala de producción. En paneles delgados, además, la orientación inducida durante el colado o la impresión puede generar anisotropía en las propiedades térmicas y mecánicas.

Para aplicaciones expuestas a agentes químicos, las matrices pobres en calcio pueden presentar ventajas frente a determinados medios ácidos, mientras que los sistemas con mayor contenido de escoria pueden ofrecer elevada resistencia inicial y baja permeabilidad frente a sulfatos neutros bajo determinadas condiciones.

Por tanto, la selección de la matriz no puede establecerse únicamente a partir de su contenido de calcio. Deben considerarse el agente de exposición, su concentración, la temperatura, la renovación del medio, la presión hidrostática y la posibilidad de una exposición térmica posterior. La selección del refuerzo debe realizarse en función de estas condiciones: los polímeros pueden contribuir al control de fisuras y al alivio de presión; el acero puede aportar tenacidad residual, sujeto a condiciones adecuadas de protección; los refuerzos minerales pueden contribuir a la estabilidad; y las fibras naturales requieren verificación de compatibilidad, estabilidad y protección frente al medio de exposición.

La Tabla 6 sintetiza el papel funcional de las principales familias de fibras identificadas en

los estudios incluidos, considerando su contribución frente a exposiciones térmicas y químicas, los principales riesgos asociados y el nivel de evidencia disponible para su aplicación. La clasificación del nivel de evidencia se utiliza únicamente como descriptor cualitativo de la amplitud y representatividad de los estudios analizados, sin constituir una puntuación global de calidad. Las diferentes familias de fibras presentan funciones y limitaciones que dependen de la interacción entre el tipo de refuerzo, la matriz, la estructura porosa y las condiciones de exposición. La evidencia disponible permite identificar funciones específicas de cada familia, pero resulta insuficiente para establecer criterios generales de desempeño frente a exposiciones térmicas y químicas combinadas, especialmente en elementos estructurales sometidos a carga.

Tabla 6

Función de las familias de fibras frente a exposición térmica y química

Familia	Contribución frente al fuego	Contribución frente a químicos	Riesgo dominante	Aplicación y madurez
PVA / PE / PP	Alta tenacidad inicial; la fusión o degradación puede aliviar la presión interna, pero reduce el puenteo de fisuras.	Controlan la apertura de fisuras; los vacíos y las interfaces pueden favorecer el transporte de agentes agresivos.	Pérdida de fibra, aumento de la porosidad conectada y disminución de la tenacidad residual.	Compuestos, paneles y aplicaciones de reparación. Evidencia media a nivel de material.
Acero	Mantiene el puenteo a mayor temperatura y puede mejorar la capacidad residual.	Limita la fisuración y puede contribuir a conservar la integridad cuando la matriz presenta suficiente densidad.	Oxidación, corrosión, pérdida de resistencia e incompatibilidad térmica.	Elementos y aplicaciones de reparación. Evidencia baja a media para exposiciones térmicas y químicas combinadas.
Basalto / vidrio	Presentan mayor estabilidad térmica que los polímeros, aunque puede producirse pérdida de adherencia en la interfaz.	Pueden contribuir al control de fisuras; su comportamiento frente a agentes químicos depende de la fibra y de la matriz.	Ataque alcalino, fragilización y pérdida de adherencia.	Paneles, morteros y prefabricados. Evidencia baja a media.
Carbono	Alta estabilidad en atmósferas protegidas y elevada resistencia específica.	La interfaz condiciona el ingreso de agentes y la transferencia de esfuerzos.	Oxidación en aire y extrapolación desde compuestos continuos.	Compuestos refractarios y piezas especiales. Evidencia baja en concreto estructural.



Tabla 6 (Continuación/1)

Familia	Contribución frente al fuego	Contribución frente a químicos	Riesgo dominante	Aplicación y madurez
Wollastonita / tremolita	Estabilidad mineral, refinamiento de la estructura y desvío de fisuras.	Pueden mejorar el empaquetamiento y la tolerancia frente a sulfatos en mezclas seleccionadas.	Dosificación elevada, trabajabilidad y heterogeneidad de la porosidad.	Morteros, recubrimientos y matrices híbridas. Evidencia media a nivel de material.
Celulosa / bambú / coco	Baja estabilidad térmica; la pirólisis puede producir pérdida de sección y de la función de refuerzo.	Pueden mejorar la flexión, pero también incrementar la absorción y la capilaridad.	Higroscopicidad, degradación alcalina o ácida y variabilidad.	Componentes no críticos y aplicaciones de baja severidad. Evidencia baja.
Híbridas	Permiten combinar el alivio de presión con el puenteo residual de fisuras.	presión con el puenteo residual de fisuras. Pueden proporcionar control multiescala de fisuras y modificar el transporte de agentes agresivos.	Interacciones no lineales, dispersión y ausencia de protocolos uniformes.	Paneles, reparación y túneles. Evidencia baja a media y necesidad de validación experimental.

4. Discusión

4.1. Síntesis basada en mecanismos

La interpretación de la evidencia indica que la respuesta de los materiales activados alcalinamente reforzados con fibras debe analizarse mediante la relación entre la composición inicial, la microestructura, las transformaciones inducidas por la exposición, el comportamiento de la interfaz y las propiedades residuales. La clasificación únicamente por precursor o tipo de fibra puede conducir a interpretaciones inconsistentes, debido a que variables como el módulo del activador, el contenido de agua, las condiciones de curado, la fracción de gel, la longitud de las fibras, su dispersión y la adherencia con la matriz modifican el comportamiento observado. Por ello, la denominación de un sistema como geopolímero de escoria o compuesto reforzado con PVA no resulta suficiente para interpretar su respuesta frente a una exposición térmica o química.

El calentamiento moderado puede producir incrementos de determinadas propiedades como consecuencia del secado y de la continuación de algunas reacciones, pero estos cambios no representan necesariamente una mejora general del comportamiento del material.

El incremento de la resistencia a compresión puede coexistir con una disminución del módulo o con un aumento de la microfisuración. Por tanto, la interpretación del desempeño térmico debe considerar simultáneamente las propiedades relevantes para cada aplicación, evitando utilizar un incremento puntual observado entre 200 y 300 °C como evidencia de una mejora generalizada frente a una exposición al fuego.

El contenido de calcio introduce diferencias importantes en la respuesta de las matrices. Los sistemas basados en escoria pueden desarrollar una resistencia inicial elevada y una estructura de poros más refinada, características que favorecen su comportamiento frente a determinados medios de exposición. Sin embargo, una mayor presencia de fases cálcicas también puede modificar los mecanismos de deterioro frente a medios ácidos y contribuir a la generación de fisuración durante el calentamiento. Las matrices pobres en calcio pueden presentar un comportamiento favorable frente a determinados ácidos y temperaturas elevadas, aunque ello no implica necesariamente una mayor resistencia inicial o una menor retracción. En consecuencia, la selección de la matriz debe relacionarse con el agente de exposición, las condiciones de servicio y la secuencia de exposiciones considerada.

Las fibras actúan principalmente sobre la fisuración y la transferencia de tensiones, mientras que una parte importante de las reacciones químicas ocurre en la matriz. En este sentido, una fibra puede retrasar la propagación de fisuras sin impedir los procesos de lixiviación o transformación del gel. Por ello, una menor pérdida de resistencia en un material reforzado con fibras no debería interpretarse de forma aislada, sino junto con la evolución de la composición, la porosidad y la interfaz. Cuando la matriz se deteriora alrededor de una fibra que conserva su integridad, la capacidad de transferencia de tensiones y, por tanto, la tenacidad del compuesto puede disminuir incluso sin una pérdida evidente del refuerzo.

4.2. Envoltente de diseño termomecánico

Una especificación frente al incendio debería incluir, como mínimo, cuatro estados: condición seca o humedad de referencia; calentamiento bajo una curva definida; desempeño durante la exposición bajo carga; y capacidad residual después del enfriamiento. Además de la resistencia, deberían medirse la temperatura interna, la deformación, la fisuración y la masa. Para las fibras poliméricas, es necesario identificar la temperatura de transición y el volumen de los canales generados; para las fibras de acero, la temperatura del refuerzo, la oxidación y la adherencia residual mediante ensayos de pull-out; y para las fibras minerales, la conservación de la interfaz.

La geometría del elemento modifica el transporte de vapor y el gradiente térmico. Las probetas pequeñas tienden a calentarse de manera más uniforme y pueden liberar humedad a través de distancias cortas. En cambio, un panel o revestimiento confinado desarrolla condiciones de presión y restricción diferentes. La transferencia de resultados obtenidos en cubos o prismas hacia secciones estructurales debe incluir un análisis higrotérmico y termomecánico calibrado. Sin esta etapa, la ausencia de spalling en laboratorio solo demuestra compatibilidad bajo ese espesor y régimen de exposición.

La combinación híbrida aparece como una estrategia para atender múltiples objetivos. Una fracción polimérica puede contribuir a reducir la presión interna, mientras que el acero,

el basalto o los refuerzos minerales pueden mantener el puenteo de fisuras. No obstante, la incorporación de fibras también aumenta la superficie interfacial, la viscosidad y el riesgo de aglomeración. La dosificación debe determinarse mediante un diseño experimental multivariable y no mediante la suma de dos dosificaciones óptimas individuales. Las métricas objetivo deberían incluir la trabajabilidad, la orientación de las fibras, los vacíos, la tenacidad antes y después del fuego y la permeabilidad posterior.

Los factores de reducción para el cálculo estructural no pueden derivarse todavía como valores universales. La evidencia disponible permite establecer curvas específicas para determinadas mezclas y rangos conservadores, pero no una tabla independiente del precursor. Un programa de calificación debería considerar diferentes lotes, edades, condiciones de humedad y calentamientos representativos; ajustar modelos constitutivos dependientes de la temperatura; y verificar al menos un elemento a escala significativa. Los valores residuales deberían acompañarse de su correspondiente incertidumbre.

4.3. Diseño frente a ambientes químicos

En el ataque ácido, la prioridad es reducir el transporte de agentes agresivos y seleccionar una red con baja susceptibilidad frente al agente específico. Una matriz pobre en calcio no es invulnerable, ya que puede experimentar dealuminación y pérdida de álcalis. Los recubrimientos o selladores pueden ser necesarios, pero deben conservar su adherencia frente a la temperatura y los movimientos del material. Las fibras naturales requieren barreras o tratamientos cuya durabilidad haya sido demostrada; de lo contrario, su capacidad de absorción puede reducir el beneficio asociado al control de fisuras.

En sulfatos neutros, la densidad inicial y la conectividad de los poros pueden ser más determinantes que una regla basada únicamente en el contenido de calcio. La evidencia de Raza et al. (2024) y Farhan et al. (2022) muestra que los sistemas ricos en escoria, cuando están adecuadamente formulados, pueden mantener su desempeño. En ácido sulfúrico, el mecanismo de deterioro cambia y esta ventaja puede



desaparecer. Las especificaciones deben diferenciar las soluciones de Na_2SO_4 y MgSO_4 , el ácido sulfúrico, el agua residual y el agua de mar, en lugar de agruparlos bajo la denominación general de “sulfatos”.

Para los cloruros y los ambientes marinos, el desempeño de la matriz debe evaluarse junto con el refuerzo metálico presente. Incluso cuando la fibra principal no sea de acero, las barras, conectores o anclajes pueden controlar la vida útil del elemento. Los ensayos de absorción o inmersión deberían complementarse con el perfil de cloruros, la resistividad, la migración y el estado electroquímico. Los ciclos de secado en ambientes tropicales pueden concentrar sales y presentar condiciones más severas que la inmersión continua.

La temperatura de servicio puede acelerar la difusión y las reacciones, por lo que los resultados obtenidos a 20 a 23 °C podrían subestimar el deterioro en condiciones tropicales o industriales. Un protocolo representativo debe controlar la temperatura, la humedad, la renovación y la presión del fluido. Asimismo, la exposición química puede modificar la conductividad térmica y el contenido de humedad antes de un incendio. Esta interacción justifica la realización de programas de exposición secuencial y no únicamente de ensayos paralelos.

4.4. Normalización y comparabilidad

La comparabilidad de los resultados se ve limitada por las diferencias en las unidades, los tamaños de las probetas, las velocidades de calentamiento y los criterios utilizados para definir el estado “residual”. Algunos estudios realizan los ensayos en caliente, mientras que otros enfrían las probetas al aire o en agua; asimismo, algunos expresan la resistencia respecto al control de la misma edad y otros respecto al valor inicial. Por ello, se recomienda reportar las curvas completas de temperatura y tiempo, la humedad previa, la masa, la deformación y el método de enfriamiento. En las exposiciones químicas, deberían declararse la relación entre el volumen de solución y la superficie expuesta, el pH inicial y final, la

renovación de la solución y los productos removidos.

La comparabilidad de los resultados se ve limitada por las diferencias en las unidades, los tamaños de las probetas, las velocidades de calentamiento y los criterios utilizados para definir el estado “residual”. Algunos estudios realizan los ensayos en caliente, mientras que otros enfrían las probetas al aire o en agua; asimismo, algunos expresan la resistencia respecto al control de la misma edad y otros respecto al valor inicial. Por ello, se recomienda reportar las curvas completas de temperatura y tiempo, la humedad previa, la masa, la deformación y el método de enfriamiento. En las exposiciones químicas, deberían declararse la relación entre el volumen de solución y la superficie expuesta, el pH inicial y final, la renovación de la solución y los productos removidos.

La caracterización microestructural debe vincularse con variables de ingeniería. Técnicas como XRD, FTIR, SEM, porosimetría y termogravimetría permiten explicar las transformaciones del material, pero no sustituyen la evaluación de la capacidad portante. Un protocolo robusto debe combinar la composición, la distribución de poros, la fisuración cuantificada, el módulo, la resistencia y la tenacidad. Para aplicaciones hidráulicas, debe incorporarse la permeabilidad; para reparación, la adherencia al sustrato; y para exposición al fuego, la integridad, el aislamiento y la resistencia bajo carga.

La incertidumbre debe reportarse de manera explícita. La variabilidad de los precursores industriales, particularmente de la escoria y la ceniza, puede modificar la reacción y la durabilidad. La calificación debería incluir el análisis químico por lote y criterios de aceptación. Los modelos de aprendizaje automático pueden contribuir al mapeo de composiciones, pero solo cuando las bases de datos incorporen condiciones de exposición y escalas comparables. Un modelo entrenado con resultados de resistencia en condiciones ambientales no permite predecir de manera confiable el daño producido por exposiciones acopladas.

4.5. Brechas de conocimiento y agenda de investigación

La evidencia disponible permite formular materiales candidatos y diseñar ensayos de calificación, pero todavía no permite asumir una equivalencia normativa con el concreto Portland en todas las aplicaciones. Los paneles, recubrimientos y morteros representan rutas de adopción temprana, debido a que permiten inspección, reemplazo y el cumplimiento de funciones específicas. Los elementos portantes requieren información adicional sobre fluencia, retracción, fatiga, adherencia con el acero, conexiones y comportamiento frente al fuego bajo carga.

La primera prioridad es evaluar exposiciones acopladas. Deben compararse las secuencias químico-fuego y fuego-químico, junto con controles paralelos, para determinar si el orden de exposición modifica el daño. Una matriz factorial puede considerar variables como el contenido de calcio, el refuerzo híbrido, el preacondicionamiento y la severidad de la exposición. Las respuestas deben incluir la pérdida de capacidad, la tenacidad, la permeabilidad y la profundidad del daño. La interacción puede cuantificarse mediante la comparación entre el efecto observado y los efectos individuales de cada exposición.

La segunda prioridad corresponde a la escala de evaluación. Se requieren losas, vigas, paneles y revestimientos que reproduzcan gradientes reales, carga sostenida y presencia de juntas. En túneles, los ensayos deben considerar la restricción, la cara expuesta y el escenario de enfriamiento; en plantas químicas, los ciclos de exposición y la abrasión; y en ambientes marinos, los procesos de secado y acumulación de sales. Los especímenes deben conservar las condiciones de mezclado y colocación del proceso industrial, debido a que la orientación de las fibras y la presencia de vacíos pueden diferir de las obtenidas en laboratorio.

La tercera prioridad es la transferencia hacia el diseño. Se necesitan modelos constitutivos dependientes de la temperatura y del daño químico, relaciones entre fisuración y transporte, y factores parciales basados en la variabilidad. Los umbrales deben establecerse de

acuerdo con la familia de la matriz y las condiciones de exposición. La trazabilidad desde el lote de producción hasta el elemento facilitará la evaluación del desempeño y el mantenimiento.

La cuarta prioridad corresponde a los aspectos ambientales y de seguridad. La sustitución de clínker puede reducir las emisiones, pero los activadores, el curado térmico, las fibras y la protección superficial también generan impactos. La evaluación del ciclo de vida debe incorporar el mantenimiento y la sustitución después de una exposición. Una mezcla con mayor intensidad inicial de recursos podría resultar favorable si evita reparaciones tempranas, mientras que una mezcla con menor huella ambiental inicial puede perder esta ventaja si presenta fallas durante el servicio.

4.6. Limitaciones metodológicas

La revisión está limitada por la heterogeneidad de las mezclas, las exposiciones, las escalas y los resultados reportados, así como por el predominio de estudios experimentales realizados en laboratorio. No fue posible calcular tamaños de efecto comparables ni evaluar el sesgo de publicación mediante métodos estadísticos. La búsqueda fue documentada y reejecutada en OpenAlex, pero no reproduce la cobertura de las bases de datos de suscripción; el rastreo retrospectivo permitió reducir parcialmente esta limitación. La valoración de la calidad y madurez de la evidencia fue cualitativa. Estas restricciones sustentan la formulación de recomendaciones conservadoras y la separación explícita entre los resultados reportados y las inferencias de diseño.

4.7. Implicaciones para infraestructura en clima tropical

En climas cálido húmedos, la condición inicial antes de un incendio puede ser más severa que la representada por probetas secadas en laboratorio. La humedad ambiental, la lluvia impulsada por el viento, la condensación y la absorción de sales mantienen agua en los poros e interfaces. Esta reserva modifica la presión de vapor, la conductividad térmica y la velocidad de calentamiento. La calificación de paneles, revestimientos, alcantarillas, instalaciones



portuarias y componentes industriales debería incluir un preacondicionamiento higrotérmico o salino representativo y no limitarse a una humedad de equilibrio interior. La secuencia clima, exposición e incendio debe formar parte del escenario de diseño.

La estrategia de mantenimiento también cambia. Las fisuras finas que no comprometen la resistencia inmediata pueden convertirse en rutas de ingreso durante los ciclos de mojado y secado. En servicio, conviene combinar la inspección visual cuantificada, la absorción o resistividad, el seguimiento del ancho de fisura y la verificación localizada de los recubrimientos. Después de un evento térmico, la evaluación no debe basarse solo en el color o la percusión, sino que requiere la cartografía del daño, la estimación de la profundidad alterada, la adherencia residual y el control de la permeabilidad. Los criterios de reparación deben diferenciar la pérdida de matriz, la pérdida de interfaz y la pérdida de fibra.

Para la contratación y el control de calidad, una especificación basada en el desempeño resulta más defendible que una receta fija. Debe identificar la clase de exposición, la temperatura de diseño, la propiedad crítica, la secuencia de ensayos y el umbral de aceptación. La mezcla candidata necesita caracterización química por lote, control del activador, contenido de aire y distribución de las fibras. Los prototipos a escala intermedia permiten detectar segregación, orientación y restricciones que no aparecen en cubos. Este enfoque reduce el riesgo de transferir resultados obtenidos con precursores de otra procedencia y facilita que la ventaja ambiental se evalúe junto con la seguridad, la durabilidad y la mantenibilidad.

5. Conclusiones

Los materiales activados alcalinamente reforzados con fibras no presentan un comportamiento térmico o químico universal, debido a que su desempeño depende de la interacción entre el gel, el contenido de calcio, la humedad, el agregado, la fibra, la interfaz, la geometría y las condiciones de exposición. Por ello, la denominación “geopolímero” o la familia

de fibra no son suficientes para especificar el comportamiento del material.

Bajo exposición térmica, algunas matrices pueden conservar o aumentar temporalmente su resistencia debido a reacciones adicionales o procesos de densificación. A mayores temperaturas, predominan la deshidratación, la contracción, la incompatibilidad y la pérdida interfacial. Las fibras poliméricas pueden aliviar la presión interna al degradarse, pero pierden capacidad de puenteo; el acero conserva su acción mecánica a mayores temperaturas, aunque presenta riesgos de oxidación; y los refuerzos minerales, carbonosos o celulósicos dependen de la estabilidad de la interfaz y de las condiciones ambientales. La resistencia residual de las probetas no es suficiente para establecer el comportamiento frente al fuego de elementos estructurales.

Frente a ácidos, sulfatos, cloruros y ambientes marinos, las fibras contribuyen al control de la fisuración, pero la química y el transporte en la matriz gobiernan procesos como la lixiviación y la precipitación. El comportamiento depende del agente agresivo, su concentración, la temperatura, la renovación de la solución, los ciclos de exposición y la condición de humedad. Por tanto, los beneficios observados corresponden a formulaciones y protocolos específicos y no pueden establecerse como umbrales universales.

La principal necesidad de investigación corresponde a la evaluación de exposiciones secuenciales o acopladas, condiciones de carga, gradientes térmicos y químicos y escalas estructurales representativas. Las formulaciones estudiadas pueden orientarse hacia aplicaciones como paneles, barreras, revestimientos, reparación y elementos prefabricados, siempre que sean sometidas a ensayos de calificación específicos. Para aplicaciones portantes se requiere mayor evidencia sobre el comportamiento a escala estructural, la adherencia residual, la permeabilidad, la variabilidad de los materiales y el desarrollo de modelos dependientes de la temperatura y del daño químico.

Contribución de los autores

G. J. Montúfar: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición.

Conflictos de interés

El autor declara no tener conflictos de interés que puedan haber influido en el desarrollo o la publicación de esta investigación.

6. Referencias bibliográficas

- Bakharev, T. (2005a). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233–1246. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>
- Bakharev, T. (2005b). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134–1147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.022>
- Bernal, S. A., y Provis, J. L. (2014). Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society. American Ceramic Society*, 97(4), 997–1008. <https://doi.org/10.1111/jace.12831>
- Bian, Y., Song, F., Liu, H., Li, R., y Xiao, C. (2024). Study on the performance of basalt fiber geopolymer concrete by freeze-thaw cycle coupled with sulfate erosion. *AIP Advances*, 14(1). <https://doi.org/10.1063/5.0187990>
- Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., y Uysal, M. (2018). High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190–1203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.062>
- Cheng, T., Xiong, C., Zhou, C., Li, Z., y Zhang, X. (2024). Effect of waste glass powder and bamboo fiber on the physico-mechanical properties and high-temperature behavior of a fly ash-based geopolymer. *ACS Omega*, 9(43), 43766–43778. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06416>
- Chindaprasirt, P., Boonbamrung, T., Poolsong, A., y Kroehong, W. (2021). Effect of elevated temperature on polypropylene fiber reinforced alkali-activated high calcium fly ash paste. *Case Studies in Construction Materials*, 15(e00554), e00554. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00554>
- Guo, L., Wu, Y., Xu, F., Song, X., Ye, J., Duan, P., y Zhang, Z. (2020). Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites. *Composites. Part B, Engineering*, 183(107689), 107689. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107689>
- He, P., Jia, D., Lin, T., Wang, M., y Zhou, Y. (2010). Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites. *Ceramics International*, 36(4), 1447–1453. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.012>
- Ibraheem, M., Butt, F., Waqas, R. M., Hussain, K., Tufail, R. F., Ahmad, N., Usanova, K., y Musarat, M. A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of quarry rock dust incorporated steel fiber reinforced geopolymer concrete and residual properties after exposure to elevated temperatures. *Materials*,



- 14(22), 6890.
<https://doi.org/10.3390/ma14226890>
- Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., y Aljanabi, M. (2022). Mechanical behavior of fiber reinforced slag-based geopolymer mortars incorporating artificial lightweight aggregate exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 315(125766), 125766.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125766>
- Kan, L., Lv, L., Chen, H., Wen, B., Ma, X., y Wang, F. (2025). High-temperature resistance of engineered geopolymer composite: Isolating the effects of key components. *Construction and Building Materials*, 481(141664), 141664.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141664>
- Kaya, M., Department of Civil Engineering, Yozgat Bozok University Yozgat, 66900 (Turkey), Köksal, F., y Department of Civil Engineering, Yozgat Bozok University Yozgat, 66900 (Turkey). (2021). Influences of high temperature on mechanical properties of fly ash based geopolymer mortars reinforced with PVA fiber. *Revista de la construcción*, 20(2), 393–406.
<https://doi.org/10.7764/rdlc.20.2.393>
- Khatib, Z. F., Megat, A. M. J., y Ramazan, D. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 345(128339), 128339.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>
- Kong, D. L. Y., y Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 334–339.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>
- Korniejenko, K., Figiela, B., Ziejewska, C., Marczyk, J., Bazan, P., Hebda, M., Choińska, M., y Lin, W.-T. (2022). Fracture behavior of long fiber reinforced geopolymer composites at different operating temperatures. *Materials*, 15(2), 482.
<https://doi.org/10.3390/ma15020482>
- Lezzerini, M., Aquino, A., y Pagnotta, S. (2024). Acid resistance of metakaolin-based geopolymers and geopolymeric mortars reinforced with coconut fibers. *Fibers (Basel, Switzerland)*, 12(5), 40.
<https://doi.org/10.3390/fib12050040>
- Liu, J., y Lv, C. (2022). Durability of cellulosic-fiber-reinforced geopolymers: A review. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(3), 796.
<https://doi.org/10.3390/molecules27030796>
- Luo, R., Liu, H., Duan, P., Ye, J., Chen, W., Zhang, Z., y Wang, A. (2023). Sulfate resistance and microstructure of metakaolin geopolymer reinforced by cellulose nanofiber and wollastonite. *Journal of Building Engineering*, 64(105580), 105580.
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105580>
- Manzoor, T., Bhat, J. A., y Shah, A. H. (2024). Performance of geopolymer concrete at elevated temperature – A critical review. *Construction and Building Materials*, 420(135578), 135578.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135578>
- Martin, A., Pastor, J. Y., Palomo, A., y Fernández Jiménez, A. (2015). Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Construction and Building Materials*, 93, 1188–1196.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.044>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021).

- The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Qin, L., Yan, J., Zhou, M., Liu, H., Wang, A., Zhang, W., Duan, P., y Zhang, Z. (2023). Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolymer composites: A review on recent progress. *Engineering Reports: Open Access*. <https://doi.org/10.1002/eng2.12708>
- Ranjbar, N., y Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement & Concrete Composites*, 107(103498), 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Raza, A., Salmi, A., El Ouni, M. H., Ghazouani, N., Ahmed, B., y Chen, W. (2024). Material characterization and thermal performance of polyethylene fiber-reinforced lightweight engineered geopolymer composites subjected to sulfate attacks. *Construction and Building Materials*, 455(139156), 139156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139156>
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., y Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>
- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., y Sabuni, B. (2024). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of geopolymer concrete: a critical review. *Discover Civil Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00028-4>
- Rivera, O. G., Long, W. R., Weiss, C. A., Jr, Moser, R. D., Williams, B. A., Torres-Cancel, K., Gore, E. R., y Allison, P. G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. *Cement and Concrete Research*, 90, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.013>
- Sá Ribeiro, M. G., Sá Ribeiro, M. G., Keane, P. F., Sardela, M. R., Kriven, W. M., y Sá Ribeiro, R. A. (2021). Acid resistance of metakaolin-based, bamboo fiber geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 302(124194), 124194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124194>
- Samal, S. (2019). Effect of high temperature on the microstructural evolution of fiber reinforced geopolymer composite. *Heliyon*, 5(5), e01779. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01779>
- Sarker, P. K., Kelly, S., y Yao, Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials in Engineering*, 63, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.059>
- Sukontasukkul, P., Intarabut, D., Phoo-ngernkham, T., Suksiripattanapong, C., Zhang, H., y 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), e02298. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02298>
- Tanyildizi, H., y Yonar, Y. (2016). Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 126, 381–387.



- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.001>
- Tawfik, G. M., Dila, K. A. S., Mohamed, M. Y. F., Tam, D. N. H., Kien, N. D., Ahmed, A. M., y Huy, N. T. (2019). A step by step guide for conducting a systematic review and meta-analysis with simulation data. *Tropical Medicine and Health*, 47(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s41182-019-0165-6>
- Vijaya Prasad, B., Anand, N., Kanagaraj, B., Kiran, T., Lubloy, E., Naser, M. Z., Arumairaj, P. D., y Andrushia, D. (2023). Investigation on residual bond strength and microstructure characteristics of fiber-reinforced geopolymer concrete at elevated temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 19(e02526), e02526. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02526>
- Zhang, P., Han, X., Hu, S., Wang, J., y Wang, T. (2022). High-temperature behavior of polyvinyl alcohol fiber-reinforced metakaolin/fly ash-based geopolymer mortar. *Composites. Part B, Engineering*, 244(110171), 110171. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110171>
- Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., y Lezcano, R. A. G. (2021). The effect of basalt fiber on mechanical, microstructural, and high-temperature properties of fly ash-based and basalt powder waste-filled sustainable geopolymer mortar. *Sustainability*, 13(22), 12610. <https://doi.org/10.3390/su132212610>