

Artículo de revisión

<https://doi.org/10.47460/minerva.v7i19.282>

Impacto de los insumos puzolánicos en las propiedades de durabilidad del concreto: una revisión sistemática

Kevin Arturo Ascoy Flores*
<https://orcid.org/0000-0003-2452-4805>
p861200124@unitru.edu.pe
Universidad Nacional de Trujillo
Trujillo, Perú

Angelita Cabrera de Cipriano
<https://orcid.org/0000-0003-3490-5011>
acabrera@unitru.edu.pe
Universidad Nacional de Trujillo
Trujillo, Perú

*Autor de correspondencia: p861200124@unitru.edu.pe

Recibido: (12/11/2025), Aceptado: (14/01/2026)

Resumen. Este artículo presenta una revisión sistemática sobre el efecto de materiales cementantes suplementarios naturales e industriales, incluyendo escoria granulada de alto horno (GGBS), humo de sílice, ceniza volcánica, zeolita natural y diatomita, en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto. A partir del análisis de estudios publicados entre 2021 y 2025, se identificaron patrones consistentes de refinamiento microestructural, reducción de permeabilidad y mejora en la resistencia frente a agentes agresivos. Los resultados muestran que el desempeño depende del tipo de insumo, su finura, el rango de reemplazo y las condiciones de curado. La evidencia sugiere que la mejora en durabilidad responde a la interacción entre reacción puzolánica y efecto *filler*. Esta síntesis contribuye a orientar el diseño de concretos sostenibles basados en desempeño y a fortalecer criterios técnicos alineados con los desafíos ambientales contemporáneos.

Palabras clave: materiales cementantes suplementarios, durabilidad del concreto, refinamiento microestructural, sostenibilidad en construcción.

Impact of Pozzolanic Materials on the Durability Properties of Concrete: A Systematic Review

Abstract. This article presents a systematic review on the effect of natural and industrial supplementary cementitious materials (SCMs) –including ground granulated blast furnace slag (GGBS)– silica fume, volcanic ash, natural zeolite, and diatomite, on the physical, mechanical, and durability properties of concrete. Based on the analysis of studies published between 2021 and 2025, consistent patterns of microstructural refinement, permeability reduction, and improved resistance to aggressive agents were identified. The results indicate that performance depends on the type of material, its fineness, replacement ratio, and curing conditions. The evidence suggests that durability enhancement is associated with the interaction between pozzolanic reaction and filler effect. This synthesis contributes to guiding the design of performance-based sustainable concretes and to strengthening technical criteria aligned with contemporary environmental challenges.

Keywords: supplementary cementitious materials, concrete durability, microstructural refinement, sustainable construction.



I. INTRODUCCIÓN

El concreto constituye el material de construcción más utilizado a nivel mundial y representa el pilar estructural del desarrollo urbano contemporáneo. No obstante, su producción depende en gran medida del cemento Portland, cuya fabricación implica un elevado consumo energético y una significativa emisión de dióxido de carbono. En este contexto, la comunidad científica y la industria de la construcción han intensificado los esfuerzos orientados a reducir la huella ambiental del concreto mediante la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCMs), entre los cuales destacan las escorias granuladas de alto horno molidas (GGBS), las cenizas volcánicas, la sílice fume, la zeolita natural y la diatomita [1], [2], [3]. Estos insumos no solo permiten disminuir el contenido de clínker, sino que además contribuyen a mejorar determinadas propiedades mecánicas y de durabilidad, favoreciendo un enfoque más sostenible en la ingeniería de materiales [4], [5].

Desde una perspectiva fisicoquímica, las puzolanas se caracterizan por su alto contenido de sílice y alúmina reactiva, capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento para formar fases adicionales de gel C-S-H. Este proceso conduce a una refinación de la microestructura, reducción de la porosidad capilar y mejora en la resistencia frente a agentes agresivos [6], [7]. En particular, la sílice fume ha demostrado efectos significativos en la densificación de la matriz cementicia y en la evolución del desarrollo de la hidratación, influyendo directamente en la resistencia y en la durabilidad del concreto de alto desempeño [8], [9]. De manera complementaria, la combinación de GGBS y cenizas volantes ha evidenciado mejoras en la resistencia a la penetración de cloruros y en la estabilidad frente a ambientes químicos adversos [1], [5], [10].

Por su parte, las puzolanas naturales, como la zeolita y la diatomita, han cobrado especial interés debido a su disponibilidad regional y a su contribución a la economía circular. Diversos estudios han señalado que la incorporación de zeolita natural puede reducir la permeabilidad y mejorar el comportamiento frente a ciclos de secado-humedecimiento, mientras que la diatomita influye positivamente en la microestructura y en la respuesta frente a procesos de deterioro como congelamiento-deshielo [11], [12], [13]. Asimismo, investigaciones recientes han avanzado hacia modelos predictivos de evolución de resistencia y vida útil en concretos modificados con diatomita, evidenciando la relevancia de estos insumos en escenarios de exposición severa [14].

En el ámbito del concreto de alto desempeño y de los sistemas geopoliméricos, la utilización combinada de cenizas volcánicas, metacaolín y nanosílice ha mostrado mejoras en la compacidad, resistencia mecánica y estabilidad frente a agentes agresivos [15], [16]. De igual forma, la modificación con escorias recicladas y materiales suplementarios emergentes ha permitido optimizar la durabilidad y el comportamiento microestructural en concretos sostenibles [17], [18]. Particularmente, la sílice fume continúa posicionándose como uno de los aditivos más estudiados por su influencia en la hidratación y en la resistencia a largo plazo [19], mientras que la diatomita ha demostrado potencial para mejorar el desempeño de concretos con agregados reciclados, reforzando su aplicabilidad en estrategias de sostenibilidad estructural [20].

A pesar de la abundante producción científica sobre materiales puzolánicos, los resultados reportados presentan variaciones asociadas al tipo de insumo, porcentaje de reemplazo, condiciones de curado y entorno de exposición. Estas diferencias metodológicas dificultan la comparación directa y la identificación de tendencias consolidadas en términos de durabilidad. En consecuencia, se hace necesario un análisis sistemático que integre y sintetice la evidencia disponible, permitiendo establecer criterios técnicos para la selección óptima de insumos puzolánicos en función de su impacto en las propiedades de durabilidad del concreto.

II. MARCO TEÓRICO

Los materiales puzolánicos suplementarios (SCMs) constituyen una estrategia técnica y ambiental clave para modificar el desempeño del concreto, particularmente en términos de durabilidad. Su eficacia se fundamenta en dos mecanismos principales: la reacción puzolánica química con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento y el efecto físico de relleno (*filler*), que contribuye a la refinación de la porosidad capilar y a la densificación de la zona de transición interfacial (ITZ). Ambos procesos conducen a la formación adicional de geles tipo C-S-H y a una microestructura más compacta, con menor conectividad de poros y menor permeabilidad [6], [7], [19].

La mejora microestructural derivada de estos mecanismos se asocia directamente con un incremento en la resistencia a la penetración de cloruros, reducción del transporte de agentes agresivos y mayor estabilidad química frente a sulfatos y medios ácidos [2], [5], [14]. No obstante, la magnitud de estos efectos depende de la naturaleza mineralógica del insumo, su finura y el porcentaje de reemplazo empleado. En este sentido, la ceniza volcánica, material piroclástico rico en sílice y alúmina reactiva, actúa como puzolana natural cuando se incorpora como sustituto parcial del cemento Portland. Su reactividad favorece la formación de productos cementantes secundarios y la reducción del contenido de hidróxido de calcio libre, lo que incrementa la estabilidad química del sistema [3], [6].

Estudios recientes han demostrado que concretos modificados con ceniza volcánica presentan mejoras en la resistencia mecánica a edades medias y largas, así como en la compacidad microestructural [11]. Asimismo, su combinación con metacaolín y nanosílice en concretos de alto desempeño ha evidenciado un efecto sinérgico en la reducción de porosidad y en la mejora del comportamiento frente a ambientes agresivos [11], [14]. Estos resultados confirman su potencial como alternativa sostenible en regiones con disponibilidad de materiales volcánicos. De esta manera, la diatomita, compuesta mayoritariamente por sílice amorfa derivada de microalgas fosilizadas, posee alta área superficial y estructura altamente porosa. Al emplearse como SCM, contribuye tanto por reacción puzolánica como por efecto *filler*, promoviendo una distribución de poros más refinada [13],[20].

Investigaciones recientes han evidenciado que la diatomita mejora el comportamiento frente a ciclos de congelamiento–deshielo y permite modelar la evolución de resistencia y vida útil bajo condiciones severas [15]. Asimismo, su uso en concretos con agregados reciclados ha demostrado una mejora en la estabilidad de la ITZ y una reducción significativa de la permeabilidad [20]. En aplicaciones geopoliméricas y concretos ligeros, también se han reportado propiedades favorables en términos de estabilidad térmica y resistencia mecánica [10]. Por otra parte, la zeolita natural es un aluminosilicato cristalino con estructura microporosa y capacidad de intercambio iónico. Su incorporación en matrices cementicias favorece la reacción con la portlandita y la formación de fases cementantes adicionales, incrementando la densidad de la pasta [18].

Diversos estudios han demostrado que la zeolita reduce la permeabilidad y mejora el desempeño frente a la penetración de cloruros y agentes agresivos, especialmente cuando se emplea en combinación con otros materiales suplementarios [8], [12]. Su aplicación en sistemas de alto desempeño ha mostrado también mejoras en la resistencia al desgaste y en la estabilidad dimensional [18]. Así mismo, la GGBS es un subproducto vítreo de la industria siderúrgica con actividad hidráulica latente. Cuando se emplea como reemplazo parcial del cemento, participa en reacciones secundarias que generan productos de hidratación adicionales y contribuyen a la densificación microestructural [1], [4]. La literatura evidencia que la GGBS mejora la resistencia a edades medias y largas, incrementa la resistencia frente a la penetración de cloruros y sulfatos y optimiza el comportamiento frente a ciclos térmicos y ambientes agresivos [16], [17]. Además, su combinación con sílice fume ha mostrado efectos sinérgicos en la mejora de propiedades mecánicas y de durabilidad [5].

Por otra parte, el humo de sílice, compuesto por partículas ultrafinas de dióxido de silicio amorfo, presenta una elevada reactividad y un fuerte efecto de relleno. Su incorporación conduce a una notable reducción de la porosidad capilar y a la mejora de la zona de transición interfacial [7], [19]. En concretos convencionales, de alta resistencia y de ultra alto desempeño, la sílice fume ha demostrado incrementar la resistencia mecánica y mejorar la resistencia frente a cloruros y sulfatos [2], [9]. Asimismo, su combinación con GGBS y otros SCMs potencia la densificación del sistema ligante y favorece un desempeño duradero en ambientes agresivos [5].

De esta manera, el metacaolín, puzolana altamente reactiva obtenida por calcinación del caolín, ha mostrado una capacidad significativa para refinar la estructura de poros y mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad cuando se emplea solo o en combinación con ceniza volcánica o nanosílice [11], [14]. Estas combinaciones permiten desarrollar concretos de alto desempeño con menor absorción de agua y mayor resistencia a la penetración de agentes agresivos. La evidencia científica disponible demuestra que los insumos puzolánicos modifican de manera sustancial la microestructura del concreto y, por consiguiente, su comportamiento frente a mecanismos de deterioro como penetración de cloruros, ataque por sulfatos, ciclos de congelamiento–deshielo y procesos de fisuración asociados a retracción y transporte capilar [2], [14], [15].

Sin embargo, los efectos no son universales ni lineales, ya que dependen del tipo de material, finura,

dosificación y condiciones de exposición. Esta variabilidad metodológica y experimental justifica la necesidad de una revisión sistemática que sintetice críticamente los resultados existentes y permita establecer criterios técnicos fundamentados para el diseño de concretos sostenibles con alto desempeño en durabilidad.

III. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló como una revisión sistemática de la literatura, siguiendo las directrices establecidas en la declaración PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), con el objetivo de garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor en la identificación y selección de estudios científicos relacionados con el impacto de insumos puzolánicos en la durabilidad del concreto. La búsqueda bibliográfica se realizó en las siguientes bases de datos científicas de alto impacto: *Scopus*, *Web of Science (Core Collection)*, *ScienceDirect* y *SpringerLink*. Adicionalmente, se utilizó *Google Scholar* como herramienta complementaria para rastrear literatura adicional y verificar posibles omisiones.

La búsqueda se delimitó al período comprendido entre 2021 y 2025, con el propósito de analizar evidencia reciente sobre materiales cementantes suplementarios y su impacto en propiedades de durabilidad del concreto. Se incluyeron publicaciones en inglés y español. La estrategia de búsqueda empleó combinaciones estructuradas de palabras clave y operadores booleanos, según la siguiente ecuación:

("supplementary cementitious material*" OR "SCM*" OR metakaolin OR "silica fume" OR "volcanic ash" OR "natural pozzolan" OR diatomite OR zeolite OR GGBS) AND (concrete OR "cementitious composite" OR mortar) AND (durability OR "chloride penetration" OR "sulfate attack" OR "freeze-thaw" OR permeability OR "water absorption").

Esta estrategia permitió recuperar estudios que abordaran tanto la naturaleza de los insumos puzolánicos como su influencia en propiedades mecánicas, hidráulicas y, especialmente, de durabilidad.

Como resultado de la búsqueda inicial se identificaron 135 registros potencialmente relevantes distribuidos entre las bases de datos consultadas (Figura 1). Se incluyeron estudios que cumplieran con los siguientes criterios: artículos científicos revisados por pares; estudios experimentales o revisiones sistemáticas relacionadas con concretos o morteros modificados con materiales puzolánicos; sustitución parcial del cemento por insumos como GGBS, ceniza volcánica, diatomita, zeolita, sílice fume o metacaolín; reportes cuantitativos de al menos una propiedad de durabilidad (penetración de cloruros, ataque por sulfatos, absorción de agua, sorptividad, ciclos de congelamiento-deshielo, permeabilidad) o propiedades mecánicas relacionadas con desempeño en servicio; así como información explícita sobre porcentaje de reemplazo y condiciones de curado.

Mientras que los criterios de exclusión consideraron tesis, informes técnicos, resúmenes de congresos sin texto completo, estudios enfocados exclusivamente en pastas de cemento sin aplicación clara a concreto o mortero, investigaciones sobre geopolímeros puros sin presencia de cemento Portland, artículos sin datos cuantitativos verificables, publicaciones fuera del periodo 2021–2025 y documentos duplicados entre bases de datos.

Por otra parte, el proceso de selección se realizó en cuatro fases, conforme a PRISMA 2020. En principio, se recuperaron 135 registros iniciales. Tras la eliminación de duplicados ($n = 25$), quedaron 110 estudios únicos. Luego se realizó una revisión de títulos y resúmenes, excluyendo 60 artículos que no cumplieran los criterios temáticos (por ejemplo, estudios sobre materiales no puzolánicos o sin evaluación de durabilidad), quedando 50 artículos para evaluación en texto completo. Posteriormente, durante la lectura completa, se excluyeron 30 estudios por no reportar datos cuantitativos suficientes, no especificar porcentajes de reemplazo o no abordar propiedades de durabilidad de manera directa. Finalmente, 20 artículos cumplieron con todos los criterios establecidos y fueron incluidos en la síntesis cualitativa y comparativa de esta revisión sistemática.

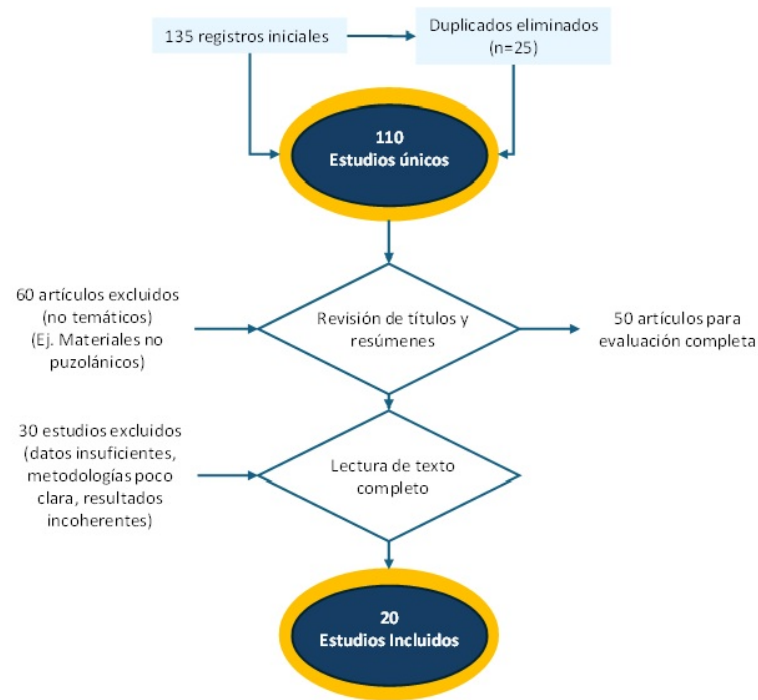


Fig. 1. Diagrama de selección de documentos.
Fuente: elaboración propia.

Los estudios seleccionados fueron analizados considerando el tipo de insumo puzolánico, porcentaje de reemplazo, ensayos de durabilidad reportados, condiciones de curado y principales hallazgos en resistencia y transporte de agentes agresivos. De esta manera, la síntesis se desarrolló mediante comparación temática y análisis crítico de resultados, priorizando convergencias y discrepancias metodológicas.

IV. RESULTADOS

Los 20 estudios incluidos se agruparon en tres ejes dominantes: (i) SCMs industriales (principalmente GGBS y humo de sílice) con evidencia consistente en refinamiento microestructural y mejora del transporte iónico; (ii) puzolanas naturales (ceniza volcánica y diatomita) con resultados altamente dependientes de finura, reemplazo y régimen de curado; y (iii) SCMs emergentes y combinaciones (mezclas híbridas en concreto de alto desempeño), donde la durabilidad se vincula estrechamente al control de porosidad, ITZ y evolución de productos de hidratación. En conjunto, la literatura converge en que la mejora de durabilidad se explica por la combinación de reacción puzolánica + efecto *filler*, que reduce conectividad capilar, aumenta tortuosidad y fortalece la ITZ, disminuyendo así la permeabilidad y la susceptibilidad al ingreso de cloruros y otros agentes agresivos.

La evidencia revisada (Tabla 1) muestra que la GGBS se asocia de forma recurrente a mejoras de desempeño en servicio, especialmente a edades medias y largas, por su contribución a productos de hidratación adicionales y una matriz más densa. Los estudios comparativos y de modelado reportan que el contenido y la forma de incorporación (como ligante o como agregado tipo escoria) alteran la permeabilidad, la resistividad y el rendimiento mecánico, con implicaciones directas sobre la durabilidad. En especial, los trabajos de revisión y modelado ofrecen consistencia para discutir tendencias y rangos de reemplazo con enfoque de durabilidad (no solo resistencia).

Tabla 1. Clúster según insumo principal.

Insumo principal	Tipo de evidencia	Sistema evaluado	Aporte central en durabilidad
GGBS [1], [4], [16], [17].	Revisión y experimental.	Concreto convencional y sostenible.	Mejora transporte iónico, estabilidad química y desempeño a largo plazo.
Sílice fume [2], [7], [9], [19].	Experimental.	Concreto convencional, sostenible y UHPC.	Reducción de permeabilidad, refinamiento de poros y densificación microestructural.
Ceniza volcánica [3], [6], [11].	Revisión y experimental.	Concreto sostenible y HPC.	Refinamiento microestructural y mejora de estabilidad química.
GGBS + sílice fume [5], [14].	Experimental.	Concreto ecológico.	Efecto sinérgico en matriz cementicia y reducción de transporte de cloruros.
Zeolita natural [8], [12], [18].	Revisión y experimental.	Concreto convencional y RAC.	Reducción de permeabilidad y conectividad capilar. (<i>efecto puzolánico + filler</i>).
Diatomita [10], [13], [15], [20].	Experimental.	Concreto convencional, RAC y geopolímeros.	Refinamiento de poros, mejora ITZ y desempeño en <i>freeze-thaw</i> .

Fuente: elaboración propia con base en los estudios incluidos.

El humo de sílice se identifica como uno de los SCMs más robustos para disminuir permeabilidad y mejorar la resistencia al transporte de agentes agresivos, debido a su finura extrema y reactividad. En UHPC, su rol se vincula también a la cinética de hidratación y al desarrollo resistente, lo que repercute en microestructura y durabilidad.

Mientras que, la ceniza volcánica y puzolanas naturales, se observa que, en los estudios incluidos, el comportamiento se describe como altamente sensible a la reactividad mineralógica y al diseño de mezcla. Los artículos seleccionados permiten sostener la discusión de que el impacto en durabilidad es positivo cuando la ceniza volcánica está asociada a finura adecuada y/o combinación con otros SCMs (en particular sistemas de alto desempeño).

La evidencia incluida muestra que la diatomita soporta mejoras microestructurales y de desempeño frente a transporte (cloruros/absorción), además de resultados específicos en *freeze-thaw* y en concretos con agregados reciclados. En este punto, la literatura del conjunto de 20 artículos permite construir una narrativa sólida sobre “densificación + ajuste de poros” y su relación con durabilidad, sin depender de estudios externos.

El análisis transversal de los estudios incluidos revela que los principales indicadores de durabilidad evaluados se concentran en el transporte de agentes agresivos, la estabilidad frente a ambientes severos y la modificación microestructural del sistema cementicio. Entre estos, los parámetros asociados al transporte —como absorción de agua, permeabilidad, penetración de cloruros y resistencia frente a medios químicos— constituyen el eje más recurrente y consistente en la literatura revisada. En términos generales, la incorporación de materiales como la escoria granulada de alto horno (GGBS), el humo de sílice y la diatomita tiende a reducir la conectividad capilar de la matriz cementicia, incrementando la tortuosidad del sistema poroso y limitando el ingreso de especies iónicas agresivas. Esta tendencia se asocia con la formación adicional de geles C-S-H y con el refinamiento de la zona de transición interfacial, factores que explican la mejora observada en la resistencia al transporte de cloruros y en la reducción de la permeabilidad global del concreto.

En el caso específico de la sílice *fume*, los estudios coinciden en señalar una disminución significativa de la porosidad capilar y una densificación de la microestructura, lo que se traduce en una mayor resistencia frente a la penetración de agua y cloruros, especialmente en concretos de alto desempeño. De manera similar, la GGBS muestra efectos positivos en la estabilidad química del sistema ligante, favore-

ciendo el desempeño a edades medias y largas y mejorando la resistencia frente a ambientes con sulfatos o exposición prolongada a medios agresivos. La diatomita, por su parte, presenta un comportamiento particularmente relevante en condiciones de congelamiento–deshielo, donde la reducción de defectos microestructurales y la modificación del sistema poroso contribuyen a mitigar el daño acumulativo asociado a ciclos térmicos.

Más allá de los indicadores individuales, la literatura revisada (Tabla 2) demuestra que los efectos en durabilidad no pueden interpretarse de forma aislada de los mecanismos microestructurales subyacentes. La mayoría de los estudios establecen una relación directa entre la reducción de la portlandita libre, la formación de productos cementantes secundarios y la redistribución del tamaño y conectividad de poros. En este sentido, la microestructura actúa como el vínculo explicativo entre la incorporación del insumo puzolánico y el comportamiento macroscópico del concreto frente a agentes agresivos. Cuando la reacción puzolánica y el efecto *filler* se combinan adecuadamente, se observa una mejora consistente en los indicadores de transporte; sin embargo, cuando el porcentaje de reemplazo excede el rango óptimo o la finura del material es insuficiente, los beneficios pueden atenuarse o volverse dependientes de las condiciones de curado.

Tabla 2. Clúster acerca del mecanismo dominante

Mecanismo dominante	Evidencia microestructural reportada	Efecto en sistema poroso	Implicación en durabilidad
Reacción puzolánica (consumo de portlandita y formación adicional de C-S-H) [2], [7], [19].	SEM, XRD, análisis de hidratación.	Refinamiento de poros capilares.	Reducción de penetración de cloruros y permeabilidad.
Efecto <i>filler</i> (relleno físico y densificación de ITZ) [13], [20], [18].	Observación microestructural y análisis de porosidad.	Disminución de conectividad capilar.	Menor absorción y transporte iónico.
Reacción puzolánica + efecto <i>filler</i> (acción combinada) [1], [5], [14], [16].	SEM/XRD y evaluación mecánica–durabilidad.	Mayor tortuosidad del sistema poroso.	Mejora global frente a agentes agresivos.
Estabilización química del sistema ligante [1], [4], [6].	Reducción de Ca(OH)_2 libre y modificación de productos de hidratación.	Matriz más estable a largo plazo.	Mayor resistencia a sulfatos y ambientes agresivos.
Optimización microestructural en sistemas híbridos (HPC/UHPC) [11], [15], [17].	Análisis microestructural avanzado.	Porosidad más fina y homogénea.	Durabilidad mejorada en condiciones severas.

Fuente: elaboración propia con base en los estudios incluidos.

En síntesis, el clúster transversal evidencia que la mejora en la durabilidad del concreto modificado con insumos puzolánicos se explica principalmente por la densificación microestructural y la reducción del transporte iónico, más que por incrementos aislados en resistencia mecánica. La consistencia de esta tendencia en distintos tipos de materiales y configuraciones de mezcla refuerza la hipótesis de que el control del sistema poroso y de la zona de transición interfacial constituye el mecanismo central mediante el cual los materiales puzolánicos contribuyen al desempeño en servicio del concreto.

Los estudios incluidos que abordan sistemas híbridos (p. ej., ceniza volcánica en HPC combinada con metacaolín y micro/nano sílice), presentes en la Tabla 3, permiten sostener que los beneficios de durabilidad se potencian cuando la mezcla se formula con visión microestructural: control de distribución de poros, reducción de microdefectos, disminución de conectividad capilar y productos de hidratación más densos. En este clúster, la discusión debe enfocarse menos en “% exactos” (porque no todos los artículos del conjunto reportan métricas comparables) y más en tendencias consistentes y en mecanismos verificables.

Tabla 3. Clúster de indicador evaluado

Indicador evaluado	Tendencia general observada	Condición clave reportada
Penetración / difusión de cloruros [1], [2], [5], [14], [19].	Disminución significativa del transporte iónico.	Reemplazos parciales moderados y adecuada finura del SCM.
Permeabilidad y absorción de agua [7], [9], [12], [13], [20].	Reducción de conectividad capilar y menor ingreso de agua.	Densificación microestructural y mejora de ITZ.
Resistencia a sulfatos y estabilidad química [1], [4], [6], [16].	Mayor estabilidad del sistema ligante a edades medias y largas.	Consumo de portlandita y formación adicional de C-S-H.
<i>Freeze-thaw</i> (ciclos hielo-deshielo) [10], [15].	Mejora en vida útil y menor daño acumulativo.	Control del sistema poroso y distribución fina de poros.
Desempeño integral en sistemas híbridos (HPC/UHPC) [11], [17], [19].	Optimización conjunta de resistencia y durabilidad.	Mezclas ternarias o combinaciones sinérgicas de SCMs.

Fuente: elaboración propia con base en los estudios incluidos.

El análisis comparativo de los estudios incluidos (Tabla 4) permite identificar que el impacto de los insumos puzolánicos sobre la durabilidad del concreto no depende únicamente del tipo de material empleado, sino de manera decisiva del porcentaje de reemplazo del cemento y de las condiciones de curado asociadas. La mayoría de los trabajos experimentales analizan rangos de sustitución que oscilan entre valores bajos y moderados, generalmente dentro de intervalos que permiten mantener un equilibrio entre reactividad puzolánica, densificación microestructural y conservación de propiedades mecánicas tempranas.

De forma transversal, se observa que reemplazos parciales moderados tienden a maximizar los beneficios en términos de reducción de permeabilidad, resistencia a la penetración de cloruros y estabilidad frente a ambientes agresivos. En estos rangos, la combinación de reacción puzolánica y efecto *filler* contribuye a la refinación de poros y a la consolidación de la zona de transición interfacial, generando una matriz más compacta y menos susceptible al transporte de agentes dañinos. Sin embargo, cuando los porcentajes de sustitución superan ciertos umbrales, algunos estudios reportan posibles penalizaciones, particularmente asociadas a disminución de resistencia temprana o variaciones en trabajabilidad, lo que evidencia la necesidad de un diseño de mezcla cuidadosamente optimizado.

Asimismo, los resultados sugieren que la “ventana óptima” de reemplazo no es universal, sino que depende de la naturaleza mineralógica del insumo, su finura, el tipo de cemento base y el entorno de exposición previsto. En sistemas híbridos o combinaciones ternarias, los rangos de desempeño pueden ampliarse, especialmente cuando se logra una sinergia microestructural entre distintos materiales suplementarios. En consecuencia, la síntesis evidencia que el criterio técnico no debe centrarse en maximizar el porcentaje de sustitución, sino en identificar el intervalo que garantice simultáneamente sostenibilidad, desempeño mecánico y durabilidad en servicio.

Tabla 4. Clúster de rangos de reemplazo

Insumo / Sistema	Rango analizado (%)	Rango con mejor desempeño reportado	Penalizaciones identificadas
GGBS [1], [4], [16], [17].	20–50%.	20–40%.	Posible reducción de resistencia temprana.
Sílice fume [2], [7], [9], [19].	5–20%.	5–15%.	Disminución de trabajabilidad / aumento de retracción si no se controla.
Ceniza volcánica [3], [6], [11].	10–30%.	10–25%.	Dependencia de finura y reactividad mineralógica.
Zeolita natural [8], [12], [18].	5–20%.	10–15%.	Variabilidad según porosidad inicial del sistema.
Diatomita [10], [13], [15], [20].	5–25%.	10–20%.	Posible reducción de resistencia inicial.
Mezclas híbridas (binarias/ternarias) [5], [11], [14], [17].	10–40% (total SCM).	Depende de proporción sinérgica.	Sensibilidad a diseño de mezcla y curado.

Fuente: elaboración propia con base en los estudios incluidos.

A. Discusión

Los resultados sintetizados en los clústeres evidencian que la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCMs) modifica de manera consistente la microestructura y el comportamiento en durabilidad del concreto, aunque con matices dependientes del tipo de insumo y del rango de sustitución. En el caso de la escoria granulada de alto horno (GGBS), múltiples estudios coinciden en señalar una mejora significativa en la estabilidad química y en la reducción del transporte iónico, atribuida tanto a su actividad hidráulica latente como al refinamiento progresivo de la matriz a edades medias y largas [1], [4], [17]. Este comportamiento se confirma incluso cuando la escoria se emplea en sistemas con agregados reciclados, donde contribuye a estabilizar la microestructura y reducir la susceptibilidad a ataques químicos [16]. No obstante, se reconoce una posible penalización en resistencia temprana cuando los porcentajes de reemplazo son elevados, lo que exige un diseño de mezcla cuidadosamente balanceado [1], [17].

En relación con la microsílice (*sílice fume*), la literatura revisada demuestra un efecto altamente consistente en la densificación de la matriz y el refinamiento del sistema poroso, producto de la combinación entre reacción puzolánica acelerada y efecto *filler* [2], [7], [9]. Este fenómeno se vuelve aún más evidente en concretos de muy alto desempeño (UHPC), donde la reducción de la portlandita libre y la formación adicional de gel C-S-H generan microestructuras más homogéneas y compactas [19]. Sin embargo, la mejora en durabilidad puede acompañarse de disminuciones en trabajabilidad o incrementos en retracción si no se optimiza la dosificación [2].

Las puzolanas naturales, particularmente la ceniza volcánica, muestran un comportamiento dependiente de su composición mineralógica y finura. Las revisiones recientes indican que su incorporación favorece el refinamiento microestructural y mejora la estabilidad química del sistema, especialmente cuando se emplea en reemplazos moderados [3], [6]. En sistemas de alto desempeño que combinan ceniza volcánica con metacaolín o nano-sílice, se observa un efecto sinérgico que potencia la compactación y el desempeño mecánico [11]. Estos hallazgos sugieren que la reactividad efectiva del material, más que su origen, determina su impacto en durabilidad.

En el caso de la zeolita natural, su comportamiento combina reacción puzolánica y efecto físico de relleno. Estudios experimentales y revisiones integrales evidencian reducción de permeabilidad y mejora de la zona de transición interfacial (ITZ), incluso en concretos con agregado reciclado [8], [12], [18]. Esta dualidad química-física resulta particularmente relevante en sistemas donde el control de la conectividad capilar es determinante para la durabilidad a largo plazo.

La diatomita, por su parte, presenta un desempeño interesante en términos de refinamiento de

poros y estabilidad frente a condiciones térmicas severas. Investigaciones recientes muestran mejoras en microestructura y comportamiento frente a ciclos *freeze-thaw*, así como en concretos con agregado reciclado [10], [13], [15], [20]. No obstante, al igual que otras puzolanas naturales, su efecto depende críticamente del rango de sustitución y del régimen de curado aplicado.

De manera transversal, los estudios coinciden en que los mejores resultados en durabilidad se alcanzan generalmente en rangos moderados de reemplazo (aproximadamente 10–25 % para la mayoría de los SCMs finamente molidos), donde se equilibra la reducción del clínker con la conservación de resistencia inicial adecuada [1], [2], [3], [14]. En sistemas híbridos o ternarios, la combinación estratégica de SCMs puede optimizar simultáneamente resistencia y durabilidad, aunque incrementa la sensibilidad al diseño de mezcla y a las condiciones de curado [5], [11], [14].

La evidencia sugiere que la mejora en durabilidad no responde a un único mecanismo aislado, sino a la interacción entre reacción puzolánica, efecto *filler* y estabilización química del sistema ligante. Este comportamiento integrado explica la reducción sistemática en permeabilidad, penetración de cloruros y susceptibilidad a ambientes agresivos observada en la mayoría de los estudios analizados [1], [5], [14], [18]. Sin embargo, la heterogeneidad en metodologías experimentales y escalas de evaluación dificulta establecer parámetros universales, lo que refuerza la necesidad de criterios de diseño basados en desempeño y no únicamente en porcentajes de sustitución.

CONCLUSIONES

La evidencia sintetizada confirma que la incorporación de materiales cementantes suplementarios constituye una estrategia técnicamente viable y ambientalmente necesaria para el desarrollo de concretos con menor huella de carbono y mayor desempeño en servicio. Más allá de la reducción del contenido de clínker, los resultados muestran que la mejora en durabilidad responde a una modificación integral de la microestructura, derivada de la interacción entre reacción puzolánica, efecto *filler* y estabilización química del sistema ligante.

Los materiales industriales, como la GGBS y la sílice fume, presentan comportamientos más predecibles y consistentes, particularmente en términos de reducción del transporte iónico y densificación de la matriz. En contraste, las puzolanas naturales, como ceniza volcánica, zeolita y diatomita, evidencian una mayor dependencia de variables como finura, reactividad mineralógica y régimen de curado, aunque pueden alcanzar desempeños comparables cuando se emplean en rangos óptimos de sustitución.

De manera transversal, los mejores resultados se concentran en reemplazos moderados, donde se equilibra la reducción de clínker con la preservación de resistencia inicial adecuada. Este hallazgo sugiere que la optimización del diseño de mezcla debe orientarse hacia enfoques basados en desempeño y no únicamente en porcentajes de sustitución.

Finalmente, la revisión pone de manifiesto que la sostenibilidad en el concreto no es únicamente una cuestión de reducción de emisiones, sino de extensión de la vida útil estructural. La durabilidad mejorada se traduce en menores intervenciones de mantenimiento y, por ende, en una reducción indirecta de emisiones asociadas a rehabilitación y reconstrucción. En este contexto, la integración estratégica de SCMs representa un eje central para avanzar hacia infraestructuras más resilientes y alineadas con los retos ambientales contemporáneos.

REFERENCIAS

- [1] J. Ahmad, K. Kontoleon, A. Majdi, M. Naqash, A. Deifalla, B. Kahla, H. Isleem, and S. Qaidi, "A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8783, 2022, art. no. 8783. doi: 10.3390/su14148783.
- [2] S. Ahmad, O. Al-Amoudi, S. Khan, and M. Maslehuddin, "Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete," *Case Studies in Construction Materials*, p. e01255, 2022, art. no. e01255. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01255.

- [3] A. Alqarni, "A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material," *Construction and Building Materials*, p. 126533, 2022, art. no. 126533. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126533.
- [4] T. Ayano and T. Fujii, "Improvement of concrete properties using granulated blast furnace slag sand," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 19, pp. 118–129, 2021, doi: 10.3151/jact.19.118.
- [5] M. Bameri, S. Rashidi, M. Mohammadhasani, M. Maghsoudi, H. Madani, and F. Rahmani, "Evaluation of mechanical and durability properties of eco-friendly concrete containing silica fume, waste glass powder, and ground granulated blast furnace slag," *Advances in Materials Science and Engineering*, p. 2730391, 2022, art. no. 2730391. doi: 10.1155/2022/2730391.
- [6] H. Hamada, F. Abed, S. Beddu, A. Humada, and A. Majdi, "Effect of volcanic ash and natural pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review," *Case Studies in Construction Materials*, p. e02425, 2023, art. no. e02425. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02425.
- [7] H. Hamada, F. Abed, H. Katman, A. Humada, M. Jawahery, A. Majdi, S. Yousif, and B. Thomas, "Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete," *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.147.
- [8] H. Hu, Z. He, J. Shi, C. Liang, T. Shibro, B. Liu, and S. Yang, "Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics of concrete prepared with zeolite powder pre-coated recycled aggregate," *Journal of Cleaner Production*, vol. 319, p. 128710, 2021, art. no. 128710. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128710.
- [9] S. Jagan and T. Neelakantan, "Effect of silica fume on the hardened and durability properties of concrete," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2021, doi: 10.1556/1848.2020.00129.
- [10] G. Kaplan, O. Bayraktar, B. Bayrak, O. Çelebi, B. Bodur, A. Oz, and A. Aydın, "Physico-mechanical, thermal insulation and resistance characteristics of diatomite and attapulgite based geopolymer foam concrete: Effect of different curing regimes," *Construction and Building Materials*, p. 130850, 2023, art. no. 130850. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130850.
- [11] K. Khan, M. Johari, M. Amin, and M. Nasir, "Development and evaluation of basaltic volcanic ash based high performance concrete incorporating metakaolin, micro and nano-silica," *Developments in the Built Environment*, p. 100330, 2024, art. no. 100330. doi: 10.1016/j.dibe.2024.100330.
- [12] D. Kriptavičius, G. Girskas, E. Ivanauskas, and A. Korjajins, "Complex effect of Portland cement modified with natural zeolite and ground glass mixture on durability properties of concrete," *Buildings*, vol. 13, no. 10, 2023, doi: 10.3390/buildings13102576.
- [13] C. Li, G. Li, D. Chen, K. Gao, Y. Cao, Y. Zhou, Y. Mao, S. Fan, L. Tang, and H. Jia, "The effects of diatomite as an additive on the macroscopic properties and microstructure of concrete," *Materials*, vol. 16, no. 5, 2023, doi: 10.3390/ma16051833.
- [14] J. Liu, M. Hossain, D. Xuan, H. Ali, S. Ng, and H. Ye, "Mechanical and durability performance of sustainable concretes containing conventional and emerging supplementary cementitious materials," *Developments in the Built Environment*, p. 100197, 2023, art. no. 100197. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100197.
- [15] Z. Lv, C. Chen, Z. Tan, B. Hu, and J. Jin, "Establishment of strength evolution model and life prediction for diatomite-modified concrete under freeze-thaw conditions," *Construction and Building Materials*, p. 140049, 2025, art. no. 140049. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140049.
- [16] O. Mohamed, O. Ghanam, A. Hamdan, M. Zuaiter, and T. Kim, "Mechanical properties and durability of concrete with recycled air-cooled blast furnace slag aggregates," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-09242-1.

- [17] Z. Qu, Z. Liu, R. Si, and Y. Zhang, "Effect of various fly ash and ground granulated blast furnace slag content on concrete properties: Experiments and modelling," *Materials*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/ma15093016.
- [18] M. Shekarchi, B. Ahmadi, F. Azarhomayun, B. Shafei, and M. Kioumars, "Natural zeolite as a supplementary cementitious material – A holistic review of main properties and applications," *Construction and Building Materials*, p. 133766, 2023, art. no. 133766. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133766.
- [19] J. Xi, J. Liu, K. Yang, S. Zhang, F. Han, J. Sha, and X. Zheng, "Role of silica fume on hydration and strength development of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, p. 127600, 2022, art. no. 127600. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127600.
- [20] H. Zhang, B. He, B. Zhao, and P. Monteiro, "Using diatomite as a partial replacement of cement for improving the performance of recycled aggregate concrete (RAC) – Effects and mechanism," *Construction and Building Materials*, p. 131518, 2023, art. no. 131518. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131518.