

Efecto del humo de sílice en las propiedades frescas, físicas y mecánicas del hormigón laterítico

Effect of silica fume on the fresh, physical and mechanical properties of lateritic concrete

Luis Daniel Flores Villanueva¹, Dianed Vasquez Aguilar², Magda Olivares Ferrufino³, Romina Mendez Torrez⁴ y Joaquin Humberto Aquino Rocha^{5,*}

*Correo de correspondencia: j.aquino@umss.edu.bo

Resumen

El objetivo de la presente investigación es evaluar el uso del humo de sílice (HS) en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón laterítico. La metodología se basó en la producción de hormigón con 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS en reemplazo del cemento Portland, además de emplear 100 % de agregado grueso laterítico. Se utilizó el cono de Abrams para evaluar la condición fresca (asentamiento). A los 7 y 28 días de curado, se evaluaron la resistencia a la compresión, las propiedades físicas (absorción, densidad e índice de vacíos) y la velocidad del pulso ultrasónico (VPU). Los resultados indican que la resistencia a la compresión aumenta cuando el contenido de HS incrementa, principalmente a 7.5 % de sustitución, pero la trabajabilidad del hormigón disminuye. Por otro lado, se observó una disminución en la absorción de agua y aumento en la densidad, lo que sugiere un hormigón más compacto. Por otro lado, la VPU indica una mayor homogeneidad interna en las mezclas con HS, confirmando los resultados mecánicos y físicos. La sustitución entre 5.0 % y 7.5 % del cemento Portland por HS mejora el desempeño del hormigón laterítico, presentando una alternativa técnicamente viable y sostenible, especialmente adecuada para construcciones en zonas tropicales, donde se tiene presencia de material laterítico.

Palabras clave: asentamiento, propiedades mecánicas, propiedades físicas, velocidad de pulso ultrasónico.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the use of silica fume (SF) on the fresh and hardened properties of lateritic concrete. The methodology involved producing concrete mixes with 2.5%, 5.0%, and 7.5% SF as a partial replacement for Portland cement, using 100% lateritic coarse aggregate. The slump test (Abrams cone) was employed to assess the fresh-state condition. After 7 and 28 days of curing, compressive strength, physical properties (water absorption, density, and void index), and ultrasonic pulse velocity (UPV) were evaluated. The results show that compressive strength increases with the SF content, particularly at 7.5% replacement, although the workability of the concrete decreases. In contrast, a reduction in water absorption and an increase in density were observed, indicating a more compact concrete. Furthermore, the UPV results reveal greater internal homogeneity in SF-containing mixes, supporting the mechanical and physical findings. Replacing 5.0%–7.5% of Portland cement with SF enhances the performance of lateritic concrete, offering a technically viable and sustainable alternative, especially suitable for construction in tropical regions where lateritic materials are abundant.

Keywords: slump, mechanical properties, physical properties, ultrasonic pulse velocity.

¹ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-6965-4154>

² Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-0144-1084>

³ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0002-2879-0748>

⁴ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0003-0963-1362>

⁵ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción civil, debido a su versatilidad, durabilidad y resistencia. Sin embargo, la producción del hormigón requiere un consumo significativo de energía y recursos naturales (Ukpata et al., 2024; Manan et al., 2025). Por un lado, el cemento Portland, uno de los principales constituyentes del hormigón, genera grandes cantidades dióxido de carbono (CO_2) durante su producción, se estima una emisión 842 kg de CO_2 por tonelada de clínker (Environment, 2018). Además, este proceso requiere un uso intensivo de materias primas no renovables, temperaturas altas y un alto consumo de energía (Rocha et al., 2022). Por otro lado, para producir hormigón se necesita una gran cantidad de agregados naturales, como la grava y la arena. La extracción excesiva de estos materiales produce efectos negativos en el medio ambiente, como la contaminación de fuentes hídricas, la degradación del suelo y la modificación de los ecosistemas locales (Watari et al., 2023; Vijerathne et al., 2024).

En respuesta a los impactos ambientales del hormigón convencional, numerosos estudios han explorado alternativas para sustituir, total o parcialmente, sus materiales constituyentes. En el caso del cemento Portland, una de las líneas de investigación más destacadas ha sido el uso de materiales cementantes suplementarios (*Supplementary Cementitious Materials*, SCMs), como la ceniza volante, la escoria de alto horno y el humo de sílice (HS), además de otros subproductos industriales y agroindustriales (Juenger et al., 2019; Snellings et al., 2023). Entre estos materiales, el HS ha recibido especial atención por sus propiedades físicas y químicas, que pueden mejorar considerablemente el desempeño del hormigón (Alhajiri & Akhtar, 2023; Hamada et al., 2023). Este subproducto, generado en la fabricación de silicio metálico y ferroaleaciones, se utiliza como adición mineral, ayudando a incrementar tanto la resistencia como la durabilidad del hormigón. Sus partículas ultrafinas permiten rellenar los vacíos entre los granos de cemento, compactando la microestructura y reduciendo la permeabilidad (Liu et al., 2025). Además, el HS reacciona de forma puzolánica con el hidróxido de calcio (CH) liberado durante la hidratación del cemento, produciendo geles adicionales de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Esta reacción contribuye a una matriz más densa, mejora la cohesión del material y refuerza su resistencia frente a medios agresivos, como ambientes con cloruros o sulfatos (Meng et al., 2025).

Al mismo tiempo, también se han explorado alternativas para reemplazar parcial o totalmente los agregados convencionales en el hormigón. Entre estas, los residuos de construcción y demolición (RCD) han sido ampliamente estudiados como posibles sustitutos (Reis et al., 2021; Fanijo et al., 2023). Sin embargo, en los últimos años ha ganado relevancia el uso de agregados de origen laterítico, especialmente en regiones tropicales donde este tipo de material es abundante (Yaragal et al., 2019; Cruz et al., 2022). El aprovechamiento de los agregados lateríticos no solo permite valorizar un recurso local, sino que también puede contribuir a disminuir el impacto ambiental asociado al transporte de materiales y a la explotación de las canteras tradicionales (Ferrufino et al., 2022). Estos agregados se caracterizan por tener una estructura porosa, baja densidad relativa y un alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, lo que puede influir directamente en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón (Naik & Marathe, 2025). Aunque presentan ciertas desventajas frente a los agregados silíceos o graníticos, como mayor absorción de agua y menor resistencia al desgaste, su amplia disponibilidad, bajo costo y buena compatibilidad con matrices cementicias los convierten en una opción viable para el desarrollo de materiales sostenibles en zonas tropicales (Muthusamy et al., 2015; Raja & Vijayan, 2020).

El uso tanto de HS como de agregados lateríticos ha demostrado ser una alternativa factible, desde el punto de vista técnico y ambiental, para la producción de hormigones más sostenibles (Yaragal et al., 2019; Alhajiri & Akhtar, 2023). No obstante, son pocos estudios los que han explorado la combinación de ambos materiales en una misma mezcla. La mayoría de las investigaciones sobre hormigón con agregados lateríticos utilizan exclusivamente

cemento Portland, sin considerar la incorporación de SCMs, que podrían contribuir a reducir el impacto ambiental (Knight et al., 2023). En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar la influencia del HS en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón elaborado con agregados lateríticos, siguiendo las tendencias actuales de sostenibilidad en la construcción civil (Corrales et al., 2025). Para esto, se diseñaron mezclas en las que el cemento fue parcialmente reemplazado por HS en proporciones de hasta 7.5 %, empleando agregados gruesos de origen laterítico. Se analizaron propiedades en estado fresco mediante el ensayo de asentamiento, así como la resistencia a la compresión a 7 y 28 días. También se midieron características físicas como la absorción de agua, la densidad y el porcentaje de vacíos. Además, se aplicó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), como indicador adicional de la calidad y homogeneidad interna del material. Este estudio propone la combinación de HS y agregados lateríticos, ofreciendo una alternativa constructiva más sostenible, especialmente adaptada a contextos tropicales donde estos materiales están disponibles.

2. Material y métodos

Materiales

Se empleó un cemento Portland tipo IP, modificado con puzolana, conforme a la norma ASTM C595 (ASTM, 2021a). Este cemento es comercializado en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. En la Tabla 1 se presentan las características químicas, físicas y mecánicas del cemento utilizado.

Tabla 1

Características del cemento utilizado

	Característica	Unidad	NB-011	Cemento IP
Química	CaO	%		52.49
	SiO ₂	%		34.79
	Al ₂ O ₃	%		6.30
	Fe ₂ O ₃	%		3.12
	MgO	%	≤6	4.75
	K ₂ O	%		1.11
	Na ₂ O	%		0.25
	SO ₃	%	≤4	2.55
	Pérdida por calcinación	%	<7	2.38
	RI	%	≤35	15.82
Física y Mecánica	Superficie específica	cm ² /g	≥2800	4710
	Residuo T325	%		8.30
	Densidad real	g/cm ³		2.85
	Densidad aparente	g/cm ³		1.03
	Tiempo de fraguado inicial	Hr	≥0.75	2.84
	Tiempo de fraguado final	Hr	≤7	5.02
	Expansión Le Chatelier	mm	≤8	0.44
	Resistencia a la compresión (3 días)	MPa	≥10	22.69
	Resistencia a la compresión (7 días)	MPa	>17	29.82
Resistencia a la compresión (28 días)	MPa	≥30	38.20	

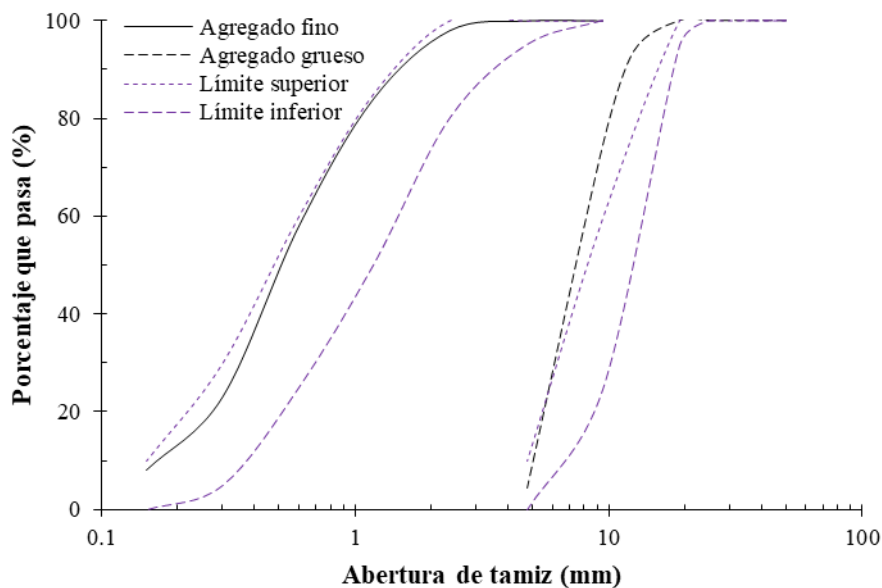
Fuente: Proporcionado por el fabricante.

El HS utilizado en esta investigación fue adquirido comercialmente en la ciudad de Cochabamba, Bolivia, como un aditivo mineral en polvo basado en la tecnología de microsílíce. Según la información proporcionada por el fabricante, el material cumple con la norma ASTM C1240 (ASTM, 2020) y está constituido por partículas finas y

altamente reactivas de dióxido de sílice (SiO_2), aproximadamente de $0.1 \mu\text{m}$. Además, no contiene cloruros ni otras sustancias perjudiciales para el hormigón. La densidad del material se encuentra en el rango de 2.10 a 2.25 kg/dm^3 . El agregado grueso laterítico fue extraído a aproximadamente 15 kilómetros al sur de la ciudad de Riberalta, Bolivia, específicamente a dos kilómetros hacia el este de la carretera que va hacia Rurrenabaque. El proceso de extracción del agregado laterítico fue realizado siguiendo los lineamientos de la ASTM D75 (ASTM, 2019). La norma ASTM C136 (ASTM, 2015) fue utilizada para realizar el análisis granulométrico de la grava y la arena (Figura 1). Se determinaron tanto el peso específico como la absorción de los agregados gruesos y finos conforme a las normas ASTM C127 (ASTM, 2024) y ASTM C128 (ASTM, 2022), respectivamente. El agregado grueso laterítico presentó un peso específico de 2.60 g/cm^3 y una absorción de 6.13% , mientras que la arena presentó un peso específico de 2.56 g/cm^3 y una absorción de 1.72% .

Figura 1

Curva granulométrica para el agregado grueso y fino



Definición de mezclas

A fin de evaluar el impacto de la aplicación de HS en el hormigón laterítico, se reemplazó parcialmente el cemento Portland por HS hasta 7.5% , siguiendo las sugerencias de la literatura (Akarsh et al., 2021; Liu et al., 2020; Azizi & Samimi, 2025). Se prepararon combinaciones con 0% de HS (referencia), 2.5% de HS, 5.0% de HS y 7.5% de HS. Se diseñó el hormigón utilizando la metodología IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993), con una resistencia de diseño de 35 MPa a los 28 días. La elección de la metodología IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993) se fundamenta en el empleo del agregado laterítico, que tiene una capacidad de absorción más elevada que un agregado convencional. Asimismo, el agregado grueso presenta una granulometría distinta a los límites recomendados por a la norma ASTM C33 (ASTM, 2018). La Tabla 2 presenta el detalle de los materiales utilizados por mezcla controlada.

Tabla 2Cantidad de materiales por mezcla (para 1 m³)

Mezclas	Cemento Portland (kg)	HS (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (litros)
Referencia	533.33	-	766.67	1100.00	224.00
2.5 % HS	520.00	13.33	766.67	1100.00	224.00
5.0 % HS	506.66	26.67	766.67	1100.00	224.00
7.5 % HS	493.33	40.00	766.67	1100.00	224.00

El hormigón fue preparado en una mezcladora mecánica, utilizando moldes cilíndricos de PVC con dimensiones de 10 × 20 cm. Las probetas fueron conformadas en tres capas, aplicando 25 golpes de compactación por capa. Los cuerpos de prueba se mantuvieron en los moldes durante 24 horas, posteriormente fueron desmoldados y colocados en curado húmedo hasta la edad de ensayo.

Métodos

La trabajabilidad del hormigón se determinó mediante el ensayo del cono de Abrams, de acuerdo con la norma ASTM C143 (ASTM, 2012). Este ensayo consiste en llenar un molde troncocónico en tres capas de igual espesor, aplicando 25 golpes de compactación por capa con una varilla metálica estándar. Posteriormente, se retira el molde verticalmente y se mide el asentamiento (*slump*) del hormigón fresco. Para cada mezcla se realizaron tres mediciones, a partir de las cuales se calculó el promedio y la desviación estándar.

La resistencia a la compresión fue determinada conforme a la norma ASTM C39 (ASTM, 2021b), que establece el procedimiento para calcular la resistencia a la compresión en muestras de hormigón cilíndricas. Las pruebas se llevaron a cabo con una prensa hidráulica Controls Automax 50-C20M82 (Figura 2), con una capacidad máxima de 3000 kN, a las edades de 7 y 28 días. Para el cálculo de la media y la desviación estándar se consideraron de tres cuerpos de prueba.

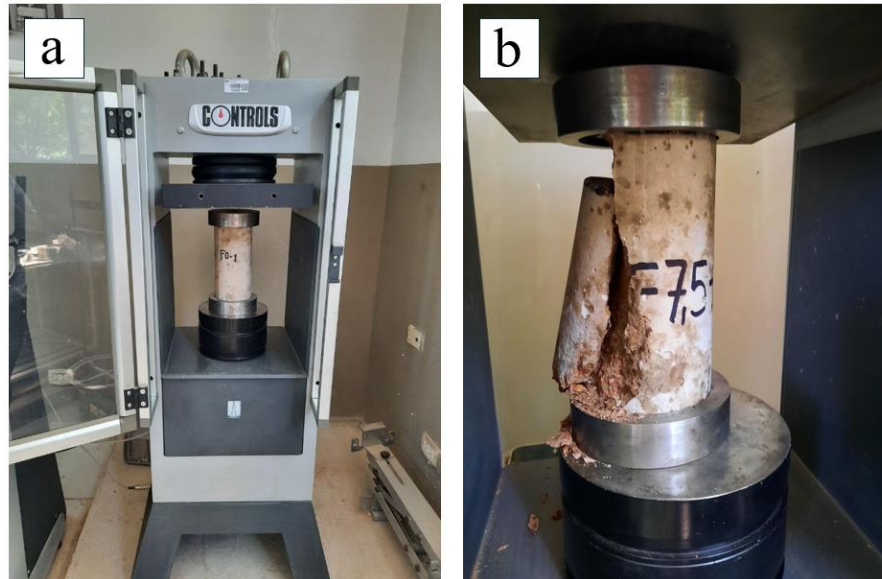
Se determinaron las propiedades físicas de absorción, densidad e índice de vacíos mediante la norma ASTM C642 (ASTM, 2021c) a los 7 y 28 días. Se utilizaron tres muestras por mezcla y edad para el cálculo de la media y la desviación estándar.

Para el análisis de la VPU se utilizó el equipo Controls 58-E4900, ensayando los cuerpos de prueba que posteriormente fueron utilizados para el ensayo de resistencia a la compresión, a las edades de 7 y 28 días. Se hicieron tres mediciones para cada cilindro, obteniéndose el promedio general y la desviación estándar de tres cilindros por mezcla y edad.

Por último, se analizaron estadísticamente todos los resultados experimentales, utilizando análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey HSD con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Figura 2

(a) Prensa Controls Automax 50-C20M82; (b) rotura de una muestra cilíndrica



3. Resultados y Discusión

Asentamiento

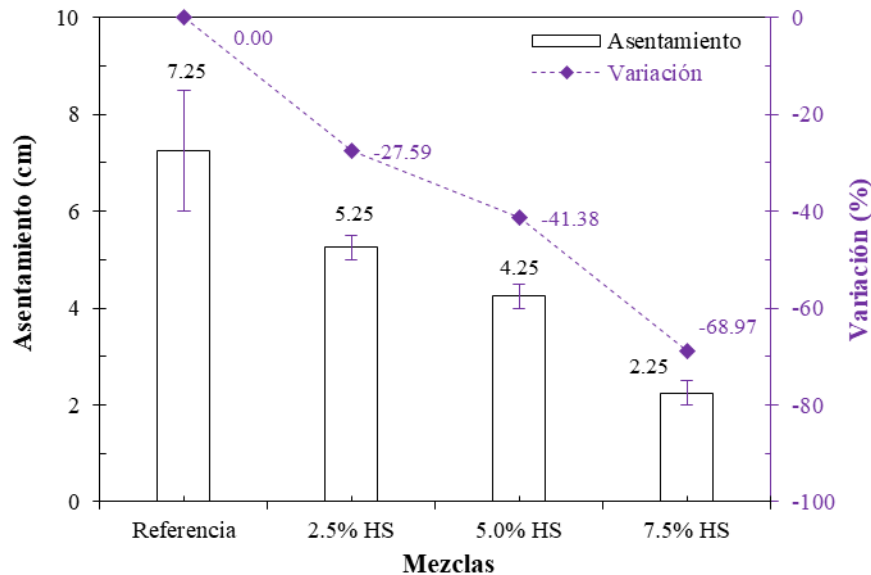
La Figura 3 presenta la variación del asentamiento del hormigón laterítico de acuerdo con el contenido de HS. Cuando la cantidad de HS aumenta, se observa una tendencia a la disminución de la trabajabilidad, con un descenso máximo del 68.97 % en la mezcla con 7.5 % de HS respecto a la referencia. Con ANOVA se verifica que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p = 0.0253$). No obstante, la prueba de Tukey HSD indicó que no hay distinciones significativas entre las mezclas con 2.5 % ($p = 0.2818$) y 5.0 % ($p = 0.1032$) de HS en comparación con la referencia. Por tanto, los resultados muestran un efecto significativo en la disminución de la trabajabilidad a partir del 7.5 % de sustitución de cemento Portland por HS.

La reducción del asentamiento se debe principalmente a la elevada finura y a la mayor área superficial específica del HS en comparación con el cemento Portland, lo que incrementa la demanda de agua en la mezcla (Alhajiri & Akhtar, 2023). En este sentido, el HS incrementa la cohesión interna y disminuye el agua libre disponible; esto puede beneficiar, por una parte, la densificación del hormigón; pero, por otra parte, producir mezclas menos manejables (Escobedo Villarruel et al., 2023). Asimismo, el HS tiene la capacidad de actuar como material de relleno en la matriz cementicia, lo que optimiza la homogeneidad y disminuye la segregación; no obstante, esta acción física impacta directamente en la trabajabilidad (Hamada et al., 2023). Además, la literatura confirma que, a medida que aumenta el contenido de HS en los compuestos cementicios, la trabajabilidad tiende a bajar (Vijayan et al., 2023). Por ejemplo, Habibi et al. (2021) informaron que el asentamiento disminuyó de 85 a 65 mm cuando se agregó un 6 % de HS. Por otra parte, Banar et al. (2022) reportaron pérdidas similares con un 8 % de sustitución de cemento Portland, resultados que son consistentes con los resultados del presente estudio. Es recomendable el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes para minimizar la disminución de trabajabilidad sin perjudicar la

relación efectiva entre el agua y el cemento. Por ejemplo, Ferrufino et al. (2022) evidenciaron que en el hormigón con agregados lateríticos se pueden emplear superplastificantes para incrementar la trabajabilidad sin perjudicar las propiedades mecánicas.

Figura 3

Asentamiento del hormigón laterítico con SF



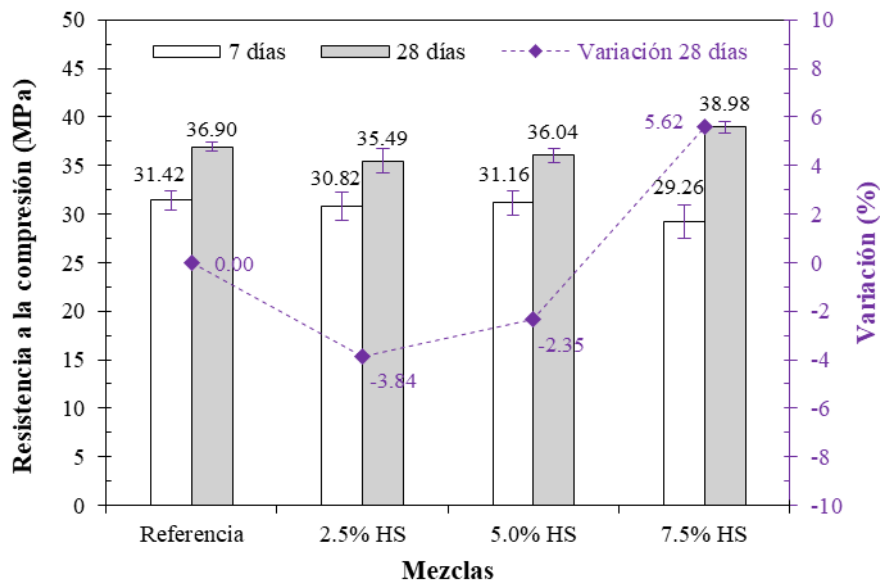
Resistencia a la compresión

La Figura 4 muestra los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón laterítico con HS añadido, a las edades de 7 y 28 días. No se aprecia una tendencia clara acerca del uso de HS sobre la resistencia a la compresión a los 7 días de curado. ANOVA indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas, una vez que $p = 0.4488 (> \alpha)$. A los 28 días se puede confirmar que la dosificación conforme al método IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993) fue adecuada, pues la mezcla de referencia logró una resistencia de 36.90 MPa, cifra que supera la resistencia de diseño (35 MPa). La presencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos fue confirmada por ANOVA ($p = 0.0120 < \alpha$). La prueba de Tukey HSD, que permite la comparación múltiple, indicó diferencias entre las mezclas con 2.5 % y 7.5 % de HS ($p = 0.0112$) y las mezclas con 5.0 % y 7.5 % de HS ($p = 0.0279$). Esto indica que, a partir del 7.5 % de sustitución, la influencia del HS en la resistencia a la compresión se vuelve más significativa en edades avanzadas.

El incremento de resistencia a la compresión con la sustitución de cemento Portland por HS se asocia principalmente a dos mecanismos que se complementan. En primer lugar, se puede mencionar el efecto de relleno, donde las partículas ultrafinas de HS generan una matriz más compacta y homogénea (Ji et al., 2024). En segundo lugar, la reacción puzolánica secundaria entre la sílice amorfa del HS y el CH resultante de la hidratación del cemento, produciendo gel adicional de C-S-H, lo cual puede explicar el aumento en la resistencia mecánica (Xi et al., 2022; Yavuz et al., 2024). Sin embargo, este proceso se da principalmente hasta los 28 días, una vez que a 7 días no existían diferencias entre las mezclas con HS y la referencia.

Figura 4

Resistencia a la compresión del hormigón laterítico con HS



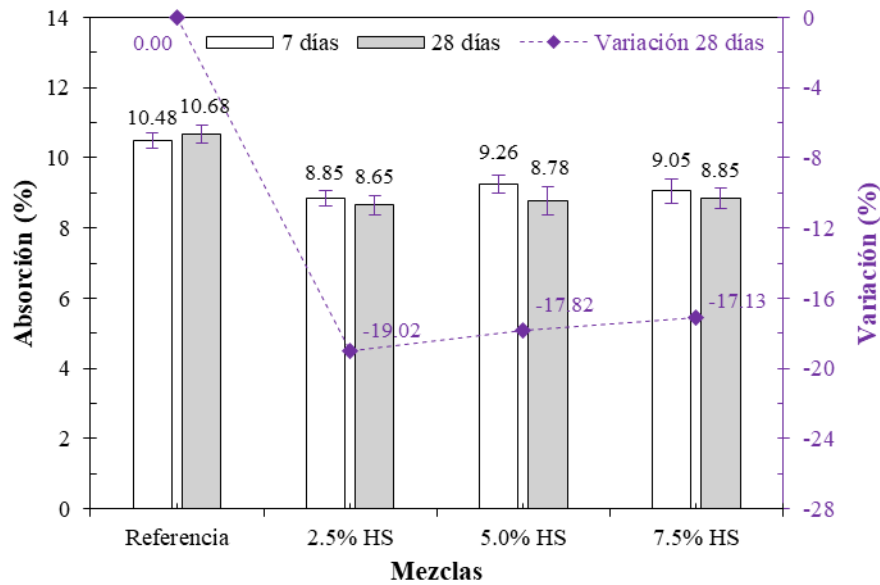
La reacción puzolánica del HS y su efecto en el incremento de la resistencia a la compresión han sido ampliamente documentados en la literatura. Generalmente, bajos porcentajes de sustitución de cemento Portland por HS resultan efectivos. Por ejemplo, Liu et al. (2020) y Azizi & Samimi (2025) recomendaron que el contenido de HS fuera del 5.0 % y 10.0 %, respectivamente. En este estudio, se observó un incremento en la resistencia a la compresión cuando se utilizó 7.5 % de HS, comparable con Akarsh et al. (2021), quienes reportaron que el uso de 7 % de HS es efectivo, pues superó a la mezcla de referencia. En particular, la incorporación de 7.5 % de HS optimiza la resistencia del hormigón laterítico, validando su aplicación como SCM en regiones tropicales donde predominan los agregados lateríticos (Cruz et al., 2022; Ukpata et al., 2024).

Propiedades físicas

La Figura 5 muestra la variación de la absorción de agua del hormigón laterítico con diferentes contenidos de HS a 7 y 28 días de curado. En general, se observa una disminución progresiva de la absorción conforme aumenta el contenido de HS. A los 7 días, la mezcla de referencia presentó la mayor absorción (10.48 %), en comparación con las mezclas con HS. A través de ANOVA, se corroboró que había diferencias significativas entre las medias ($p = 0.0056 < \alpha$). De igual manera, la prueba de Tukey HSD demostró que la absorción de agua disminuye significativamente con la adición de HS, con valores de $p = 0.0048$, $p = 0.0215$ y $p = 0.0098$ para 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS, respectivamente. La misma tendencia se mantuvo a los 28 días, con variaciones relevantes entre las mezclas ($p = 0.011 < \alpha$). La prueba de Tukey HSD confirmó que todas las mezclas con HS presentaron una absorción significativamente menor que la de referencia, demostrando que la incorporación de HS reduce la absorción de agua del hormigón laterítico.

Figura 5

Absorción del hormigón laterítico con HS



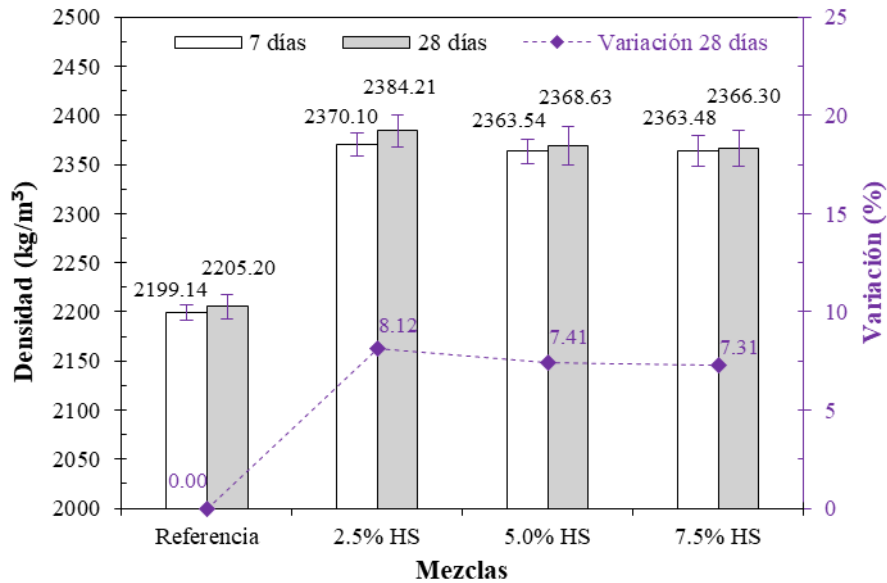
La disminución de la absorción de agua puede atribuirse principalmente al efecto de refinamiento de poros inducido por la incorporación de HS, resultado tanto del efecto de relleno como de la reacción puzolánica. La matriz cementicia se vuelve más compacta y menos permeable gracias a las partículas ultrafinas del HS y al gel C-S-H adicional, relleno de los poros y los espacios capilares (Mohan & Mini, 2018; Siddique, 2011). Los resultados estadísticos confirmaron que este proceso se intensifica con la edad, a medida que avanza la hidratación y la reacción puzolánica. Sin embargo, los valores de absorción son más altos que los hormigones convencionales. Esto se debe a la gran porosidad y capacidad de absorción de los agregados lateríticos utilizados (Fanijo et al., 2020). En este sentido, Muthusamy et al. (2015) señalaron que los hormigones con un 65 % de agregados lateríticos absorben más agua, y Yaragal et al. (2019) también informaron que el empleo del 100 % de agregado fino laterítico produce valores de absorción entre el 6 % y el 10 %. Más recientemente, Ukpata et al. (2024) evidenciaron que la absorción se eleva a medida que el porcentaje de agregado grueso laterítico crece, llegando a 4.75 % para contenidos del 25 %.

La Figura 6 muestra los resultados de la densidad del hormigón laterítico después de 7 y 28 días de curado. En los dos casos, se nota un aumento de la densidad al añadir HS en comparación con el hormigón de referencia. A los 7 y 28 días, ANOVA permitió evidenciar diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas ($p < \alpha$), con valores de $p = 2.10 \times 10^{-5}$ y $p = 5.30 \times 10^{-10}$, respectivamente. Estos resultados fueron corroborados por la prueba de Tukey HSD, revelando que la mezcla de referencia tuvo la densidad más baja en comparación con las mezclas con HS. Los valores de p , a los 7 días, fueron de 2.9×10^{-5} , 3.7×10^{-5} y 3.7×10^{-5} para proporciones de 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS respectivamente. Estos resultados evidencian que la densidad del hormigón laterítico se eleva con el HS. Se observó la misma conducta a los 28 días, con diferencias notables entre el compuesto de referencia y el uso de 2.5 % ($p = 7.4 \times 10^{-5}$), 5.0 % ($p = 0.0001$) y 7.5 % ($p = 0.0030$) de HS. Por tanto, la incorporación de HS favorece la densificación del hormigón laterítico, tanto a edades tempranas como avanzadas. El incremento de la densidad con la adición de HS se asocia al efecto de relleno y al consecuente refinamiento microestructural del hormigón (Liu et al., 2025). Las partículas ultrafinas del HS se alojan en los vacíos capilares de la pasta cementicia, reduciendo la

porosidad y aumentando la compacidad del material. De forma simultánea, la reacción puzolánica secundaria contribuye a ocupar los espacios previamente porosos y a reforzar la matriz (Verma et al., 2020; Hamada et al., 2023).

Figura 6

Densidad del hormigón laterítico con HS

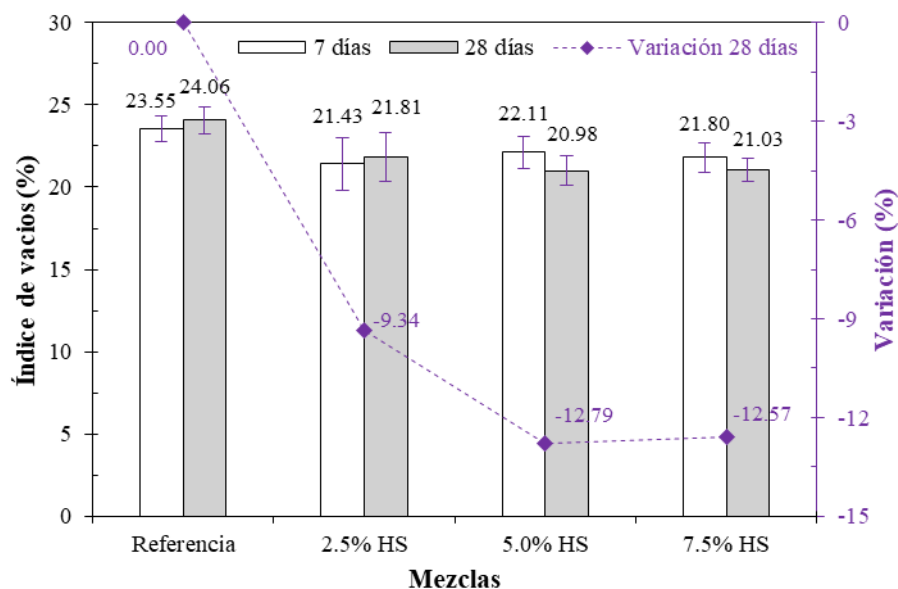


La variación del índice de vacíos del hormigón laterítico a 7 y 28 días de curado se presenta en la Figura 7. En ambos casos, se puede distinguir que el índice de vacíos en las mezclas con HS es inferior al de la mezcla de referencia. En la mezcla de referencia, el índice de vacíos es más alto, 23.55 % y 24.06 % para 7 y 28 días de edad, respectivamente. Pese a que las mezclas con HS presentaron, en términos generales, valores más bajos, estas discrepancias no fueron estadísticamente significativas. Esto se debe a que ANOVA reportó valores de $p = 0.4646$ y $p = 0.0821$ para 7 y 28 días, respectivamente, ambos superando el nivel de significancia (α).

La ligera disminución del índice de vacíos observada con la incorporación de HS puede asociarse, primeramente, a la densificación de la matriz cementicia inducida por los mecanismos previamente descritos, principalmente el efecto de relleno de partículas finas y la formación adicional de gel C-S-H producto de la reacción puzolánica. No obstante, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas indica que, para contenidos de HS iguales o inferiores al 7.5 %, el refinamiento de la porosidad no es lo suficientemente marcado como para reflejarse en el índice de vacíos del hormigón.

Figura 7

Índice de vacíos del hormigón laterítico con HS



Este comportamiento puede atribuirse, a la naturaleza porosa de los agregados lateríticos utilizados, los cuales presentan una elevada capacidad de absorción de agua. La porosidad del agregado tiende a influenciar la respuesta del ensayo, atenuando el impacto del HS sobre la compactación total del material, aun cuando otras propiedades físicas y mecánicas, como la absorción de agua, la densidad aparente, la resistencia a la compresión y la VPU, evidencien mejoras con el incremento del contenido de HS.

Adicionalmente, debe considerarse que el ensayo de índice de vacíos basado en la norma ASTM C642 (ASTM, 2021c) cuantifica los vacíos accesibles al agua, por lo que puede no ser suficientemente sensible para detectar el refinamiento de poros a nivel de la pasta cementicia, particularmente asociado a la reducción de poros capilares finos y a la densificación de la microestructura inducida por el HS. En este sentido, la interpretación de los resultados del índice de vacíos puede considerarse preliminar y complementaria a otras propiedades físicas evaluadas en el presente estudio.

Resultados similares han sido reportados en la literatura, por ejemplo, Adil et al. (2020) observaron una reducción del índice de vacíos del 21.2 % al 18.8 % al incorporar un 5.0 % de HS como sustituto parcial del cemento Portland, mientras que Alhajiri & Akhtar (2023) señalaron que contenidos de HS de hasta el 10 % favorecen la mejora de propiedades físicas y de durabilidad del hormigón, principalmente debido al efecto de relleno y a la reacción puzolánica. En conjunto, los resultados que la incorporación muestran que el HS contribuye a la mejora del desempeño del hormigón; sin embargo, la confirmación directa del refinamiento de poros requeriría la aplicación de técnicas de caracterización microestructural específicas, como la microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) y la porosimetría por intrusión de mercurio (*Mercury Intrusion Porosimetry, MIP*), las cuales se proponen como parte de estudios futuros.

La ligera disminución del índice de vacíos observada con la incorporación de HS puede asociarse, primeramente, a la densificación de la matriz cementicia inducida por los mecanismos previamente descritos, principalmente el efecto de relleno de partículas finas y la formación adicional de gel C-S-H producto de la reacción puzolánica. No

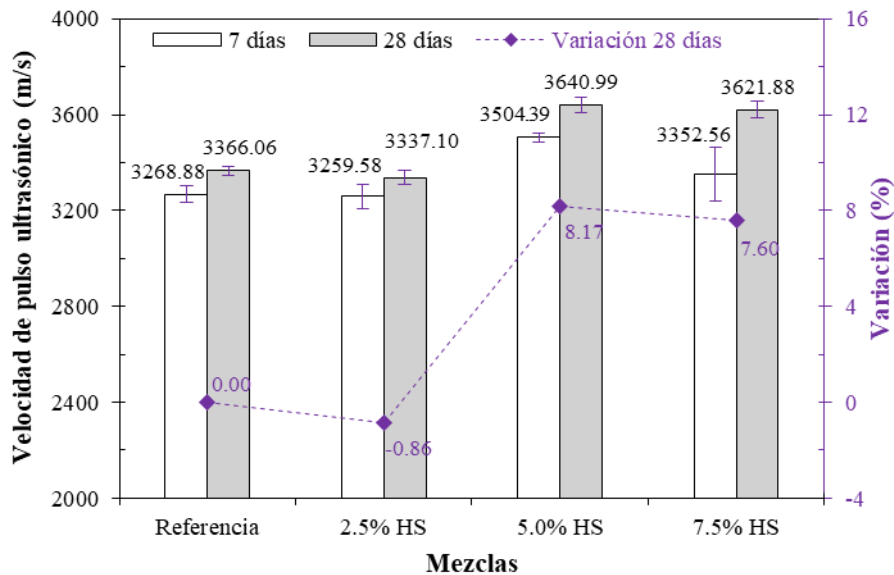
obstante, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas indica que, para contenidos de HS iguales o inferiores al 7.5 %, el refinamiento de la porosidad no es lo suficientemente marcado como para reflejarse en el índice de vacíos del hormigón.

Velocidad de pulso ultrasónico

La VPU es un valor empleado para determinar la calidad y la homogeneidad interna del hormigón, una vez que se relaciona con el nivel de continuidad y compactación de la matriz (Saremi et al., 2023). La Figura 8 muestra los resultados de VPU para las edades de 7 y 28 días. Por lo general, se nota un aumento gradual de la VPU con el tiempo de curado y con la cantidad de HS, lo cual demostrando una mejora en la compactación del material. En ambos casos, a los 7 y 28 días, ANOVA constató diferencias estadísticamente significativas ($p < \alpha$), con $p = 0.0171$ y $p = 8.61 \times 10^{-6}$, respectivamente. La prueba de Tukey HSD reveló una diferencia estadísticamente relevante entre la mezcla de referencia y la que contiene un 5.0 % de HS ($p = 0.0259$). A los siete días, la VPU no mostró grandes cambios entre la mezcla de referencia y las mezclas con HS. Las diferencias se volvieron más evidentes a los 28 días, pues la mezcla con un 2.5 % de HS ($p = 0.7710$) y la referencia mostraron similitud, mientras que las mezclas con un 5.0 % ($p = 7.41 \times 10^{-5}$) y un 7.5 % ($p = 0.0001$) de HS tuvieron diferencias significativas. Estos resultados demuestran que la adición de HS aumenta la rapidez con que se propaga el pulso ultrasónico, particularmente a 28 días, lo que indica una estructura interna de mayor densidad y homogeneidad.

Figura 8

VPU del hormigón laterítico con HS



Los resultados evidencian que la incorporación de 5.0 % de HS incrementa de manera significativa la VPU, especialmente a edades avanzadas, reflejando una estructura interna más densa y homogénea (Hasanzadeh & Shooshpasha, 2019). Este comportamiento está relacionado directamente con la disminución de la porosidad y el aumento de la densificación en la matriz cementicia, lo cual es consistente con los resultados sobre las propiedades físicas y de resistencia a la compresión. Una matriz más compacta propicia una propagación de las ondas

ultrasónicas más veloz, debido a que la rapidez de transmisión está determinada por la homogeneidad y rigidez del material (Hamid et al., 2021; Hong et al., 2021). Asimismo, el incremento progresivo de la VPU entre los 7 y 28 días refleja la evolución del proceso de hidratación y el desarrollo de las reacciones puzolánicas tardías del HS (Ahmad et al., 2022). Resultados similares fueron reportados por Ferrufino et al. (2022), quienes observaron un aumento de la VPU en hormigones con agregado laterítico modificados con aditivos superplastificantes, reportando un máximo valor de 3709 m/s, atribuido al aumento de la densificación interna y la reducción de la porosidad conectada. De manera análoga, las mezclas con 5.0 % y 7.5 % de HS en el presente estudio alcanzaron valores de VPU superiores a 3600 m/s, pudiéndose considerar como hormigones de buena calidad (Aquino Rocha et al., 2025), lo que confirma el efecto positivo del HS sobre la homogeneidad y cohesión del hormigón laterítico.

La sustitución parcial de cemento Portland por HS influye de manera integral en el comportamiento del hormigón laterítico, afectando tanto las propiedades en estado fresco como en estado endurecido. La trabajabilidad se redujo a medida que el contenido de HS aumentó, debido a que las partículas tienen una mayor finura y área superficial específica, lo cual hace que la mezcla necesite más agua y tenga mayor cohesión interna (Escobedo Villarruel et al., 2023). No obstante, esta disminución de fluidez fue contrarrestada por mejoras en la compacidad, la resistencia mecánica y la calidad interna del material. Se observó una tendencia a la baja del índice de vacíos, un incremento en la densidad, una disminución de la absorción de agua y un aumento en la resistencia a la compresión y VPU, principalmente a 28 días de curado. En particular, el progreso de la VPU muestra una mayor uniformidad y continuidad interna, lo que la convierte en un indicador indirecto del nivel de densificación y de la calidad del hormigón laterítico modificado con HS (Hong et al., 2021). En resumen, los resultados corroboran que la aplicación de HS no solo mejora el rendimiento físico y mecánico del hormigón laterítico, sino que se presenta como una opción sostenible y viable para usos estructurales en áreas tropicales.

4. Conclusión

El impacto del HS como reemplazo parcial del cemento Portland en las características mecánicas, físicas y frescas del hormigón laterítico fue examinado en el presente estudio. A partir de los resultados experimentales se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- La trabajabilidad del hormigón laterítico disminuye con la inclusión de HS, con pérdidas considerables de asentamiento a partir del 7.5 %, debido a las propiedades físicas del HS, que aumentan tanto la demanda de agua en estado fresco como la cohesión interna.
- La resistencia a la compresión se incrementó de manera gradual con el contenido de HS, principalmente con la sustitución del 7.5 %. Este fenómeno se explica por el relleno físico de los poros y la reacción puzolánica secundaria, densificando la matriz cementicia.
- Se constató un aumento de la densidad del hormigón y una disminución en la absorción de agua con la incorporación de HS, lo que demuestra una mejora de la compacidad del hormigón.
- A medida que el HS aumentó, la tendencia del índice de vacíos fue de disminución, aunque sin que existieran diferencias estadísticamente significativas, lo que puede ser explicado por la porosidad inherente de los agregados lateríticos.
- La VPU mostró una uniformidad interna más alta en el hormigón con un 5.0 % y un 7.5 % de HS, categorizando así el material como de buena calidad.
- El contenido ideal de HS es entre 5.0 % y 7.5 %. Este rango permite alcanzar un balance apropiado entre calidad interna, resistencia mecánica y densificación, demostrando el potencial del HS como un SCM para regiones tropicales.

Aunque los hallazgos obtenidos muestran la capacidad del HS como aditivo mineral para optimizar las propiedades físicas, mecánicas y no destructivas del hormigón con agregados lateríticos, el presente estudio se limitó a la evaluación del desempeño a edades tempranas, específicamente a 7 y 28 días. En este sentido, se recomienda que investigaciones futuras analicen el comportamiento del material a edades más avanzadas, considerando su evolución a largo plazo y su respuesta bajo condiciones de exposición agresiva, tales como ambientes con presencia de sulfatos, cloruros o ciclos de humectación–secado.

Adicionalmente, para una comprensión más integral del rendimiento del hormigón laterítico modificado con HS, se sugiere que estudios posteriores incorporen evaluaciones de durabilidad, análisis microestructurales que permitan confirmar el refinamiento de la porosidad de la matriz cementicia, así como análisis de ciclo de vida y estimaciones de costos. Estas líneas de investigación permitirán validar los mecanismos responsables de las mejoras observadas y evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de su aplicación en el sector de la construcción.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen algún conflicto de interés.

5. Referencias bibliográficas

- Adil, G., Keven, J. T., & Mann, D. (2020). Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
- Ahmad, S., Al-Amoudi, O. S. B., Khan, S. M., & Maslehuddin, M. (2022). Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01255.
- Akarsh, P. K., Marathe, S., & Bhat, A. K. (2021). Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand. *Construction and Building Materials*, 268, 121093.
- Alhajiri, A. M., & Akhtar, M. N. (2023). Enhancing sustainability and economics of concrete production through silica fume: a systematic review. *Civil Engineering Journal*, 9(10), 2612-2629.
- Aquino Rocha, J. H., Murillo Borda, W., Herrera Rosas, M., & Cayo Chileno, N. G. (2025). Comparative Evaluation of Grids for the Detection of Internal Defects in Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity: Experimental Approach. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 30(4), 04025074.
- ASTM (2012). ASTM C143/C143M-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2015). ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2018). ASTM C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2019). ASTM D75/D75M-19: Standard Practice for Sampling Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2020). ASTM C1240-20: Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021a). ASTM C595/C595M-21: Standard specification for blended hydraulic cements. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021b). ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021c). ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2022a). ASTM C128-22: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2024). ASTM C127-24: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- Azizi, M., & Samimi, K. (2025). Effect of silica fume on Self-compacting Earth Concrete: Compressive

- strength, durability and microstructural studies. *Construction and Building Materials*, 472, 140815.
- Banar, R., Dashti, P., Zolfagharnasab, A., Ramezaniapour, A. M., & Ramezaniapour, A. A. (2022). A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete. *Journal of Building Engineering*, 46, 103802.
- Corrales, H. N. C., Real, E. A. T., Llaves, M. C. M., Villarroel, J. G. P., & Rocha, J. H. A. (2025). Recycled and waste materials in construction in Bolivia: a systematic literature review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(2), 108.
- Cruz, G. K. A., Neto, O. D. M. M., Arruda, S. M., Lucena, L. C. D. F. L., Ziegler, C. R., & da Silva, G. C. B. (2022). Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. *Construction and Building Materials*, 314, 125201.
- Environment, U. N., Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- Escobedo Villarruel, J. F., Rocha, J. H. A., & Cayo, N. G. (2023). Evaluación del uso de microsíllice como material cementicio suplementario (MCS) en el hormigón. En *CONPAT 2023: XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción* (Vol. 1). <https://doi.org/10.21041/CONPAT2023/V1CC4573>
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9, 100199.
- Fanijo, E., Babafemi, A. J., & Arowojolu, O. (2020). Performance of lateritized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 250, 118829.
- Ferrufino, A. S., Colque, J. A. T., Torrez, R. M., & Rocha, J. H. A. (2022). Influencia del aditivo superplastificante en el hormigón con agregado laterítico: Influence of the superplasticizing additive in concrete with lateritic aggregate. *Métodos y Materiales*, 12, 42-51.
- Habibi, A., Ramezaniapour, A. M., Mahdikhani, M., & Bamshad, O. (2021). RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume. *Construction and Building Materials*, 270, 121431.
- Hamada, H. M., Abed, F., Katman, H. Y. B., Humada, A. M., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., ... & Thomas, B. S. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8887-8908.
- Hamid, R., Yusof, K. M., & Zain, M. F. M. (2010). A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. *Construction and Building Materials*, 24(1), 94-98.
- Hasanzadeh, A., & Shooshpasha, I. (2019). Effects of silica fume on cemented sand using ultrasonic pulse velocity. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(11), 1184-1200.
- Helene, P. R. L., & Terzian, P. (1993). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo, Brasil: Pini.
- Hong, G., Oh, S., Choi, S., Chin, W. J., Kim, Y. J., & Song, C. (2021). Correlation between the compressive strength and ultrasonic pulse velocity of cement mortars blended with silica fume: An analysis of microstructure and hydration kinetics. *Materials*, 14(10), 2476.
- Ji, X., Han, F., Pan, T., Zhao, W., Sha, J., & Liu, J. (2024). Decoupling the physical and chemical effects of silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 444, 137851.
- Juenger, M. C., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257-273.
- Knight, K. A., Cunningham, P. R., & Miller, S. A. (2023). Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 139, 105049.
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N., & Shi, D. (2020). Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103665.

- Liu, Z., Jiao, Y., Zhang, Y., Li, P., & Du, Y. (2025). Partial replacement of silica fume with waste glass powder in UHPC: Filling micropores and promoting hydration. *Construction and Building Materials*, 490, 142581.
- Manan, A., Pu, Z., Sabri, M. M., Alattiyh, W., Ahmad, J., & Alzlfawi, A. (2025). Environmental and human health impact of recycle concrete powder: an emergy-based LCA approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1505312.
- Meng, L. Y., Wang, Y. S., Sun, F., Lin, R., & Wang, X. Y. (2025). An integrated strength-carbon emissions-total cost model for silica fume concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04327.
- Mohan, A., & Mini, K. M. (2018). Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra fine GGBS. *Construction and Building Materials*, 171, 919-928.
- Muthusamy, K., Kamaruzaman, N. W., Ismail, M. A., & Budiea, A. M. A. (2015). Durability performance of concrete containing laterite aggregates. *KSCE journal of civil engineering*, 19(7), 2217-2224.
- Naik, P. A., & Marathe, S. (2025). Exploring the Potential of Lateritic Aggregates in Pervious Concrete: A Study on Mechanical Properties and Predictive Techniques. *CivilEng*, 6(2), 30.
- Raja, R., & Vijayan, P. (2020). Strength and microstructural behaviour of concrete incorporating laterite sand in binary blended cement. *Revista de la Construcción*, 19(3), 422-430.
- Reis, G. S. D., Quattrone, M., Ambrós, W. M., Grigore Cazacliu, B., & Hoffmann Sampaio, C. (2021). Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Materials*, 14(7), 1700.
- Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D., & Cayo-Chileno, N. G. (2022). Sustainable alternatives to CO₂ reduction in the cement industry: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 436-439.
- Saremi, S. G., Goulias, D. G., & Akhter, A. A. (2023). Non-destructive testing in quality assurance of concrete for assessing production uniformity. *Transportation Research Record*, 2677(1), 1259-1275.
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932.
- Snellings, R., Suraneni, P., & Skibsted, J. (2023). Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*, 171, 107199.
- Ukpata, J. O., Ewa, D. E., Success, N. G., Alaneme, G. U., Otu, O. N., & Olaiya, B. C. (2024). Effects of aggregate sizes on the performance of laterized concrete. *Scientific Reports*, 14(1), 448.
- Verma, S. K., Singla, C. S., Nadda, G., & Kumar, R. (2020). Development of sustainable concrete using silica fume and stone dust. *Materials Today: Proceedings*, 32, 882-887.
- Vijayan, D. S., Devarajan, P., & Sivasuriyan, A. (2023). A review on eminent application and performance of nano based silica and silica fume in the cement concrete. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103105.
- Vijerathne, D., Wahala, S., & Illankoon, C. (2024). Impact of crushed natural aggregate on environmental footprint of the construction industry: enhancing sustainability in aggregate production. *Buildings*, 14(9), 2770.
- Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A. C., & Cullen, J. (2023). Growing role of concrete in sand and climate crises. *Iscience*, 26(5).
- Xi, J., Liu, J., Yang, K., Zhang, S., Han, F., Sha, J., & Zheng, X. (2022). Role of silica fume on hydration and strength development of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 338, 127600.
- Yaragal, S. C., Gowda, S. B., & Rajasekaran, C. (2019). Characterization and performance of processed lateritic fine aggregates in cement mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 10-25.
- Yavuz, D., Akbulut, Z. F., & Guler, S. (2024). Porous concrete modification with silica fume and ground granulated blast furnace slag: Hydraulic and mechanical properties before and after freeze-thaw exposure. *Construction and Building Materials*, 447, 138099.