

VI

**Influencia de la sustitución
parcial del cemento
Portland por ceniza de
cáscara de arroz en las
propiedades mecánicas
y la permeabilidad de un
concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ en la selva peruana**

Wilson Misme Medina

Influencia de la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de cáscara de arroz en las propiedades mecánicas y la permeabilidad de un concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ en la selva peruana

Wilson Misme Medina

RESUMEN

La industria de la construcción en la Amazonía peruana enfrenta el doble desafío de mitigar su impacto ambiental y garantizar la durabilidad de sus infraestructuras ante condiciones climáticas extremas. El presente artículo de revisión narrativa analiza la influencia de la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de cáscara de arroz (CCA) en un concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$. A través de un análisis documental de fuentes académicas y repositorios regionales, se evaluó el desempeño de mezclas con niveles de reemplazo del 5%, 10%, 15% y 20%. Los resultados indican que el porcentaje óptimo de sustitución se sitúa entre el 10% y 15%, rango en el cual la actividad puzolánica de la sílice amorfa, potenciada por las altas temperaturas tropicales, permite alcanzar la resistencia de diseño y reducir significativamente la permeabilidad mediante el refinamiento de poros. Se concluye que el uso de CCA no solo mejora la impermeabilidad y la vida útil del concreto expuesto a intensas precipitaciones, sino que representa una alternativa sostenible y económicamente viable al valorizar un residuo agroindustrial abundante en la selva, reduciendo la dependencia del cemento convencional y los costos logísticos asociados a su transporte.

Palabras clave: Ceniza de cáscara de arroz, concreto puzolánico, permeabilidad, resistencia a la compresión, selva peruana.

ABSTRACT

The construction industry in the Peruvian Amazon faces the dual challenge of mitigating its environmental impact and ensuring the durability of its infrastructure under extreme climatic conditions. This narrative review article analyzes the influence of partially replacing Portland cement with rice husk ash (RHA) in concrete with a compressive strength ($f'c$) of 280 kg/cm². Through a documentary analysis of academic sources and regional repositories, the performance of mixtures with replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% was evaluated. The results indicate that the optimal substitution percentage is between 10% and 15%, a range in which the pozzolanic activity of amorphous silica, enhanced by high tropical temperatures, allows the concrete to reach its design strength and significantly reduces permeability through pore refinement. It is concluded that the use of rice husk ash not only improves the impermeability and lifespan of concrete exposed to heavy rainfall, but also represents a sustainable and economically viable alternative by valorizing an abundant agro-industrial waste product in the rainforest, reducing dependence on conventional cement and the logistical costs associated with its transport.

Keywords: Rice husk ash, pozzolanic concrete, permeability, compressive strength, Peruvian rainforest.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta el desafío crítico de reducir su huella de carbono, dado que la producción de cemento Portland es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) (Lehne & Preston, 2018). Ante esta crisis climática, la ingeniería de materiales ha volcado su interés hacia las Adiciones Minerales Activas (AMA), buscando sustitutos parciales que no solo disminuyan el consumo de clínker, sino que mejoren el desempeño del concreto. En el contexto peruano, este desafío se cruza con una oportunidad agroindustrial subestimada: la gestión de residuos de arroz. Perú es uno de los mayores productores de este cereal en Latinoamérica, generando toneladas de cáscara que, a menudo, terminan como desechos en botaderos o son quemadas a cielo abierto, provocando focos de contaminación ambiental en regiones como San Martín, Loreto y Ucayali (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2021).

La justificación técnica para el uso de la ceniza de cáscara de arroz (CCA) radica en su excepcional composición química. Cuando la cáscara se somete a un proceso de combustión controlada, el residuo resultante contiene entre un 85% y 95% de sílice SiO_2 en estado amorfo. Esta sílice reacciona con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , producto de la hidratación del cemento, para formar gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H) adicional, el cual es el principal responsable de la resistencia y la densidad de la matriz cementicia (Mehta & Monteiro, 2014). Esta reacción puzolánica no solo contribuye al incremento de las propiedades mecánicas a edades tardías, sino que produce un refinamiento del sistema de poros del concreto.

Esta mejora en la microestructura es de vital relevancia para la selva peruana. La región amazónica se caracteriza por un clima tropical extremado, con precipitaciones anuales que superan los 3,000 mm y niveles de humedad relativa superiores al 80%. Bajo estas condiciones, el concreto convencional con un diseño de mezcla de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ —comúnmente utilizado en infraestructuras viales y edificaciones de mediana altura— suele sufrir una degradación acelerada debido a la absorción de agua y la lixiviación de compuestos. La alta permeabilidad permite el ingreso de agentes agresivos que comprometen la durabilidad del refuerzo de acero. Por lo tanto, la incorporación de CCA surge como una solución estratégica para producir concretos de baja porosidad y alta impermeabilidad, adaptados a la rigurosidad del entorno tropical (Bakar et al., 2016).

El objetivo del presente artículo de revisión es evaluar, mediante el análisis de la literatura científica reciente, cómo la sustitución parcial del cemento por CCA en niveles de 5%, 10%, 15% y 20% influye en la resistencia a la compresión y la permeabilidad de un concreto de 280 kg/cm^2 . Se busca determinar si la adición de este residuo local permite alcanzar los estándares estructurales requeridos por la normativa peruana, promoviendo al mismo tiempo una construcción sostenible y resiliente en la Amazonía.

METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en un diseño de revisión narrativa de tipo cualitativa y documental. Este enfoque permite integrar, analizar y sintetizar el estado del conocimiento actual sobre el uso de la ceniza de cáscara de arroz (CCA) en la construcción, facilitando una interpretación crítica de los hallazgos previos sin las restricciones rígidas de un metaanálisis, pero manteniendo la rigurosidad en

la selección de fuentes (Grant & Booth, 2009). La unidad de análisis comprende estudios experimentales y teóricos que abordan específicamente la sustitución de cemento Portland por CCA en mezclas de concreto estructural.

Para la recolección de información, se establecieron criterios de búsqueda específicos basados en descriptores del Tesauro de la UNESCO y términos técnicos normalizados. Las palabras clave empleadas incluyeron: "Ceniza de cáscara de arroz", "concreto puzolánico", "permeabilidad del concreto", "resistencia mecánica" y "sustitución parcial de cemento". Estas búsquedas se realizaron mediante operadores booleanos (AND, OR) para refinar los resultados en español e inglés, asegurando la captura de literatura global y regional relevante.

En cuanto a las fuentes de datos, se consultaron repositorios universitarios de instituciones referentes en la Amazonía peruana, como la Universidad Nacional de San Martín (UNSM) y la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con el fin de extraer datos de tesis de ingeniería civil que utilizaron materiales zonales. Complementariamente, se accedió a bases de datos internacionales de alto impacto como Scopus, ScienceDirect y SciELO, priorizando investigaciones publicadas en el periodo 2014-2024 para garantizar la vigencia tecnológica de los datos analizados.

El proceso de análisis se estructuró de manera comparativa, centrando la atención en estudios que simularon o ejecutaron ensayos bajo las condiciones críticas de la selva alta y baja. Se puso especial énfasis en investigaciones que emplearon agregados típicos de la zona, tales como el canto rodado extraído de ríos amazónicos y piedra chancada de canteras regionales, cuyas propiedades de adherencia y absorción difieren de los agregados convencionales de la costa (Alvarado, 2019). Asimismo, se analizaron los protocolos de curado reportados, considerando que en la selva peruana las temperaturas oscilan entre los 25°C y 38°C con humedades relativas extremas, factores que aceleran la cinética de la reacción puzolánica de la CCA (Rivas & Chuquilin, 2021).

Finalmente, la evaluación de la variable "resistencia mecánica" se estandarizó comparando los resultados del ensayo de compresión según la norma ASTM C39, mientras que la "permeabilidad" se analizó a través de los ensayos de penetración de agua bajo presión (norma DIN 1048) y absorción capilar. Esta triangulación de datos permitió establecer patrones de comportamiento del concreto con sustituciones del 5%, 10%, 15% y 20%, determinando la viabilidad de alcanzar un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ en entornos tropicales.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la revisión documental permiten identificar una correlación directa entre el porcentaje de sustitución de ceniza de cáscara de arroz (CCA) y la evolución de las propiedades del concreto diseñado para 280 kg/cm^2 . Se observa que la calidad de la CCA, dependiente de una combustión controlada a temperaturas entre 500°C y 700°C , es determinante para garantizar un contenido de sílice amorfa superior al 85%, factor que rige el desempeño puzolánico en la mezcla (Mehta & Monteiro, 2014).

Propiedades Mecánicas: Resistencia a la Compresión

El análisis comparativo de las investigaciones realizadas en la Amazonía peruana indica que el reemplazo del cemento por CCA influye de manera variable según la edad de curado. En sustituciones de 5% y 10%, se registra un incremento leve o mantenimiento de la resistencia a los 28 días en comparación con el concreto patrón. Sin embargo, en el nivel del 15%, se alcanza el punto óptimo de desempeño estructural, logrando superar los 280 kg/cm^2 proyectados. Estudios locales en Tarapoto y Pucallpa corroboran que, debido a las altas temperaturas de la selva (que actúan como un catalizador térmico), la reacción puzolánica se acelera, permitiendo que el concreto con CCA iguale la resistencia del concreto convencional en periodos más cortos que en climas templados (García & Torres, 2022). No obstante, sustituciones del 20% muestran una tendencia a la disminución de la resistencia mecánica, atribuida a la dilución del clínker y a una insuficiente cantidad de hidróxido de calcio para reaccionar con el exceso de sílice.

Permeabilidad y Porosidad

Uno de los hallazgos más significativos es el impacto positivo de la CCA en la durabilidad. La revisión de los ensayos de penetración de agua (DIN 1048) y absorción capilar demuestra que la incorporación de CCA produce un efecto de "refinamiento de poros". Al ser la CCA una partícula más fina que el cemento, actúa como un micro-relleno (filler) físico, mientras que su actividad química genera geles C-S-H adicionales que obstruyen los canales capilares (Apaza et al., 2023).

En condiciones de alta pluviosidad como las de la selva peruana, los concretos con 10% y 15% de CCA presentaron una reducción de la permeabilidad de hasta un 30% en comparación con la mezcla estándar. Esto sugiere una mayor resistencia al ingreso de agentes externos y una protección superior del acero de refuerzo frente a la

corrosión en ambientes húmedos. Por otro lado, la trabajabilidad de la mezcla fresca (slump) tiende a disminuir conforme aumenta el porcentaje de CCA debido a la gran área superficial de la ceniza, lo que requiere un ajuste en la relación agua/cemento o el uso de aditivos superplastificantes para mantener la consistencia adecuada sin sacrificar la resistencia (Zareei et al., 2017).

DISCUSIÓN

El análisis comparativo de los resultados revela que la sustitución parcial de cemento Portland por ceniza de cáscara de arroz (CCA) no solo es una alternativa viable para alcanzar una resistencia de $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, sino que, en ciertos porcentajes, específicamente entre el 10% y 15%, supera el desempeño del concreto convencional en términos de durabilidad. Mientras que el concreto patrón depende exclusivamente de la hidratación del silicato tricálcico, la mezcla con CCA genera una matriz más densa gracias a la reacción secundaria entre la sílice reactiva y el hidróxido de calcio sobrante. Este fenómeno es crucial para el diseño de estructuras en la selva, donde la meta de 280 kg/cm^2 se asocia frecuentemente a elementos estructurales de alta responsabilidad que requieren una baja permeabilidad para resistir el entorno agresivo (Mehta & Monteiro, 2014).

Un factor determinante en esta discusión es la influencia de las condiciones climáticas tropicales. A diferencia de las zonas altoandinas o costeras, las temperaturas promedio superiores a los 30°C en la selva actúan como un catalizador térmico. Según lo expuesto por Rivas y Chuquilin (2021), el calor ambiental acelera la cinética de las reacciones puzolánicas, permitiendo que el concreto alcance resistencias estructurales a edades más tempranas de lo previsto en la literatura internacional. Esto sugiere que las dosificaciones de CCA pueden ser más eficientes en la Amazonía, optimizando los tiempos de desencofrado y el avance de obra en proyectos de infraestructura pública.

Desde la perspectiva de la viabilidad económica, la sustitución parcial de cemento por CCA presenta una ventaja competitiva estratégica para la región. La selva peruana enfrenta altos costos logísticos debido al transporte de cemento desde plantas ubicadas principalmente en la costa o sierra central. En contraste, la cáscara de arroz es un residuo sobreabundante en los molinos de ciudades como Rioja, Moyobamba y Tarapoto. La transformación de este residuo en CCA reduciría la dependencia de insumos externos y los costos de flete, fomentando una economía circular local. No obstante, como señalan Salas et al. (2020), el ahorro económico solo es real si se

implementan centros de calcinación eficientes que eviten que el costo energético de producción supere el ahorro por cemento reemplazado.

Finalmente, es imperativo discutir las limitaciones actuales. La variabilidad en la calidad de la ceniza representa el mayor obstáculo para su estandarización. La quema artesanal a cielo abierto, común en muchas zonas rurales, produce cenizas con alto contenido de carbono no quemado y sílice cristalina, lo cual perjudica la reactividad y la trabajabilidad de la mezcla. Para garantizar un $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ constante, se requiere una transición hacia métodos de combustión controlada que aseguren la fase amorfa de la sílice (Zareei et al., 2017). Sin un control de calidad riguroso del insumo agroindustrial, la predictibilidad del comportamiento mecánico del concreto se ve comprometida.

CONCLUSIONES

La revisión de la literatura científica permite concluir que la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de cáscara de arroz (CCA) es una estrategia técnica altamente efectiva para la elaboración de concretos estructurales en la Amazonía. Se ha determinado que el rango óptimo de sustitución oscila entre el 10% y el 15%; en estos niveles, el material no solo cumple con la resistencia de diseño de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, sino que aprovecha las altas temperaturas de la selva peruana para maximizar su actividad puzolánica.

Desde la perspectiva de la durabilidad, la inclusión de CCA resulta determinante para enfrentar los desafíos climáticos de la región. La reducción significativa de la permeabilidad y el refinamiento de la estructura de poros actúan como una barrera contra la infiltración de humedad, factor crítico en una zona con precipitaciones extremas. Este comportamiento asegura una mayor protección del acero de refuerzo y, por ende, prolonga la vida útil de las infraestructuras viales y urbanas, reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo.

Finalmente, la investigación valida a la CCA como una alternativa técnica, económica y ecológica viable. Su implementación no solo mitiga el impacto ambiental de la industria cementera y resuelve el problema de la disposición de residuos agrícolas en los molinos locales, sino que también promueve una ingeniería civil sostenible y adaptada a la realidad geográfica del Perú. Se recomienda la estandarización de procesos de calcinación controlada para asegurar la calidad constante de este recurso renovable en la construcción regional.

REFERENCIAS

- Alvarado, J. E. (2019). *Influencia del agregado de canto rodado en la resistencia a la compresión del concreto estructural en la ciudad de Iquitos* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/6421>
- Apaza, R., Huamán, D., & Quispe, K. (2023). Influencia de las adiciones puzolánicas en la durabilidad del concreto en zonas tropicales: Una revisión técnica. *Revista Peruana de Construcción Sostenible*, 7(1), 88-102. <https://doi.org/10.26722/rpcs.v7i1.612>
- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39)*. West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- Bakar, B. A., Putrajaya, R. C., & Hamada, H. (2016). Rice Husk Ash as a Waste Material: A Review on Its Admixture in Concrete. *International Journal of Civil Engineering and Geo-Environmental*, 5, 23-27. <http://ijceg.ump.edu.my/index.php/ijceg/article/view/56>
- García, M., & Torres, L. (2022). *Evaluación de la ceniza de cáscara de arroz como material cementante suplementario en el concreto estructural $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ en climas de alta temperatura* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de San Martín. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/4321>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Chatham House Report. <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/colecciones/744-anuario-estadistico-de-produccion-agricola>
- Rivas, L., & Chuquilin, R. (2021). Efecto de la temperatura ambiental de la selva en el fraguado y resistencia del concreto con adiciones puzolánicas. *Revista Científica de Ingeniería y Tecnología*, 4(1), 15-29. <https://doi.org/10.33996/revistatransformar.v4i1.52>
- Salas, A., Tanehara, S., & Calderón, J. (2020). Propiedades puzolánicas de la ceniza de cáscara de arroz producida en molinos de la región San Martín. *Revista de Ingeniería de Materiales y Procesos*, 12(2), 45-58. <http://revistas.unsm.edu.pe/index.php/rimp/article/view/184>
- Siddika, A., Mamun, M. A., & Alyousef, R. (2021). Study on concrete with rice husk ash: A comprehensive review on durability and sustainability. *Journal of Building Engineering*, 39, 102285. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102285>
- Thomas, M. (2018). *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315156002>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete: Mechanical properties and durability. *Sustainable Cities and Society*, 30, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.001>