

Análisis de la resistencia del hormigón H21, H25 utilizando Puzolana del Pericarpio Motacú Castaña Residual

Analysis of the strength of concrete H21, H25 using pozzolan from the Motacú Chestnut Residual Pericarp

Daniel CLAURE A.^{1*}, Klever CLAURE H.², Moises HURTADO V.², Dani Junior MENDEZ M.².

¹Universidad Autónoma de Beni “José Ballivián”, Carrera de Ingeniería Civil, Estructuras Isostáticas, Riberalta, Beni. Estado Plurinacional de Bolivia. <https://orcid.org/0009-0006-5928-0790>

²Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”, Estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil, Riberalta, Beni, Estado Plurinacional de Bolivia.

Autor para correspondencia*: danielclaure1@hotmail.com

RESUMEN

Se evalúa el efecto de la incorporación de puzolanas naturales obtenidas del pericarpio del motacú (*Attalea phalerata*) y de la castaña residual (*Bertholletia excelsa*) sobre las propiedades mecánicas del hormigón de clases H-21 y H-25, con el objetivo de promover alternativas sostenibles en la construcción regional de Riberalta. Los residuos agroindustriales fueron procesados mediante secado, calcinación y pulverización hasta lograr un tamaño de partícula que cumple con el tamiz N° 200, caracterizándose sus propiedades físicas y granulométricas. Se diseñaron mezclas con sustituciones parciales de cemento Portland IP 30 (Portland Puzolánico) COBOCE bajo (Norma Boliviana NB 011:2013) al 10 %, 15 % y 25 %. Los especímenes fueron curados en condiciones estándar y ensayados a compresión a 7, 14 y 28 días, comparándose los resultados con hormigones convencionales sin adición. Los ensayos mostraron mejoras de resistencia en reemplazos del 10 % y 15 %, especialmente entre los 14 y 28 días, mientras que la sustitución del 25 % provocó una ligera disminución. Se observó que la sustitución del 10 % del cemento por pericarpio de motacú calcinado fue adecuada en H-21, y que la castaña residual permitió hasta un 15 % en H-25 sin comprometer la resistencia. Estas evidencias confirman la viabilidad técnica del uso de estas puzolanas como materiales cementantes suplementarios y su contribución a reducir el consumo de cemento, aprovechar residuos locales y fortalecer la economía circular.

Palabras clave: Resistencia a compresión, materiales cementantes suplementarios, puzolanas naturales, construcción sostenible.

ABSTRACT

The effect of incorporation of natural pozzolans obtained from the pericarp of motacú (*Attalea phalerata*) and residual chestnut (*Bertholletia excelsa*) on the mechanical properties of concrete of classes H-21 and H-25 is evaluated, with the objective of promoting sustainable alternatives in the regional construction of Riberalta. The agroindustrial residues were processed through drying, calcination, and pulverization until they reached a particle size that complied with sieve No. 200, thereby characterizing their physical and granulometric properties. Mixture were designed with partial substitutions of Portland cement IP 30 cement (Portland Pozzolanic) COBOCE under (Bolivian Standard NB 011:2013) at 10%, 15%, and 25%. The specimens were cured under standard conditions and tested in compression at 7, 14, and 28 days, with the results compared to those of conventional concretes without addition. Tests showed strength improvements at 10% and 15% replacements, especially between 14 and 28 days, while the 25% substitution caused a slight decrease. It was observed that a 10% replacement of cement with calcined motacu pericarp was adequate

at H-21, and that residual chestnut allowed up to 15% at H-25 without compromising strength. This evidence confirms the technical feasibility of using these pozzolans as supplementary cementitious materials and their contribution to reducing cement consumption, taking advantage of local waste and strengthening the circular economy.

Keywords: Compressive strength, supplementary cementitious materials, natural pozzolans, circular economy.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más empleados en la construcción a nivel mundial debido a su resistencia, durabilidad y versatilidad estructural. No obstante, la producción de cemento, componente esencial en su elaboración, es una de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones más sostenibles dentro de la ingeniería civil. En este contexto, el uso de puzolanas como sustituto parcial del cemento ha cobrado gran interés debido a sus propiedades reactivas y su potencial para mejorar el desempeño del hormigón.

Las puzolanas, caracterizadas por su composición silícea-aluminosa, reaccionan en presencia de agua con el hidróxido de calcio, generando compuestos cementantes que contribuyen a la resistencia del material. En este estudio, se examina el empleo de puzolanas obtenidas del pericarpio del motacú y la castaña residual, materiales de fácil disponibilidad en la región de Riberalta, Beni, Bolivia. La utilización de estos subproductos no solo representa una alternativa viable para la reducción del uso de cemento, sino que también fomenta la economía circular al reutilizar residuos agroindustriales.

El análisis comparativo se enfoca en evaluar el comportamiento del hormigón H-21 y H-25 al sustituir parcialmente el cemento en proporciones del 10%, 15% y 25%. Mediante ensayos de laboratorio, se busca determinar el impacto de estas adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón, particularmente

en su resistencia a compresión. Además, se analiza su viabilidad para aplicaciones en la construcción local, considerando factores como las condiciones de curado y el tiempo de fraguado.

Los resultados de esta investigación no solo aportan información relevante sobre el uso de materiales alternativos en la producción de hormigón, sino que también generan conocimientos fundamentales para la implementación de prácticas constructivas más sostenibles en la ciudad de Riberalta. Se espera que estos hallazgos contribuyan a la formulación de estrategias que promuevan el uso eficiente de recursos locales y reduzcan el impacto ambiental de la industria del hormigón.

MATERIALES Y MÉTODOS

En cuanto a los materiales utilizados principales fueron arena amarilla gruesa de Guayaramerín, grava canto rodado de Rurrenabaque, cemento Pórtland tipo IP30 COBOCE, agua potable con PH neutro y puzolanas provenientes del pericarpio del fruto del motacú y la castaña residual en proporciones de 10%, 15% y 25%. Para la determinación de la granulometría de los áridos, se emplearon tamices de diferentes aberturas y números como 3/8", 1/4", #4, #8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200 para la arena y 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N° 4 y N° 8 siguiendo el método ASTM C136 (ASTM International, 2019). Además, se utilizaron equipos como balanzas, hornos, brochas, espátulas, recipientes

para la preparación y análisis de las muestras, también un tanque de agua (Fragoso Doria & Visbal Jacome, 2021).

En cuanto a los materiales alternativos, se emplearon puzolanas naturales obtenidas a partir de residuos agroindustriales disponibles en la región. Estas incluyen cenizas derivadas del pericarpio del motacú (*Attalea phalerata*) y cenizas de la castaña residual (*Bertholletia excelsa*). Ambos materiales fueron sometidos a un tratamiento previo que incluyó calcinación y tamizado, con el objetivo de mejorar su reactividad y optimizar su incorporación en la mezcla de hormigón.

El proceso de preparación de las puzolanas comenzó con la recolección y secado de los residuos de motacú y castaña. Estos fueron sometidos a un secado natural a temperatura ambiente durante 72 horas, con el fin de reducir su contenido de humedad y evitar alteraciones en las reacciones químicas del hormigón. Posteriormente, los materiales secos fueron sometidos a calcinación en un horno controlado a temperaturas que oscilaron entre los 600° C y 800° C durante un periodo de tres horas, con la finalidad de inducir su actividad puzolánica y mejorar su reactividad con el cemento.

Una vez completado este proceso, las cenizas obtenidas fueron molidas y tamizadas a través de una malla de 75 µm, garantizando una granulometría adecuada para su incorporación en la mezcla y evitando la presencia de partículas de gran tamaño que pudieran afectar la cohesión del hormigón. Para evaluar el efecto de la sustitución parcial del cemento por puzolanas en el comportamiento del hormigón, se elaboraron mezclas de hormigón H-21 y H-25, con diferentes niveles de reemplazo del cemento por cenizas de motacú y castaña residual. Se consideraron tres niveles de sustitución: 10%, 15% y 25%, además de una mezcla

de referencia sin adiciones. La dosificación de los materiales se realizó conforme a normativas nacionales e internacionales, garantizando la correcta mezcla y su resistencia mecánica.

Para la evaluación experimental se tomó como referencia los aportes teóricos de Ramos Galarza (2021), se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón con dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, siguiendo los procedimientos establecidos. Luego del moldeo, las probetas fueron sometidas a un curado en agua a temperatura controlada de ± 23° C, manteniéndose en condiciones de humedad constante para asegurar el adecuado desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento. Se establecieron tres edades de ensayo para la resistencia a compresión: 7, 14 y 28 días, con el objetivo de analizar la evolución del desempeño mecánico de las mezclas en el tiempo.

El análisis de los resultados del presente estudio se realizó considerando dos variables independientes: el tipo de hormigón (H-21 y H-25) y el porcentaje de sustitución del cemento por puzolanas (0%, 10%, 15% y 25%). La variable dependiente fue la resistencia a compresión medida a las edades de ensayo de 7, 14 y 28 días (ASTM International, 2019).

Se aplicó un análisis descriptivo para cada combinación de variables, calculando la media, desviación estándar y coeficiente de variación de la resistencia a compresión de cada mezcla, con el objetivo de evaluar la tendencia central y dispersión de los datos (Mohsen, 2023).

Para determinar la significancia de las diferencias entre los distintos niveles de sustitución y tipos de hormigón, se realizó un ANOVA factorial (tipo de hormigón × porcentaje de sustitución), considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. En caso de encontrar diferencias significativas, se aplicó la

prueba post hoc de Tukey para identificar qué combinaciones de variables presentaban diferencias estadísticamente relevantes (Deboucha *et al.*, 2017; Beuntrner *et al.*, 2019).

RESULTADOS

La investigación se centra en dos materiales residuales específicos: el pericarpo del Motacú (*Attalea phalerata*) y la castaña residual (*Bertholletia excelsa*). Se determinaron sus efectos en la resistencia a compresión del hormigón H-21 y H-25 cuando se incorporan en proporciones del 10%, 15% y 25%. El estudio busca establecer la viabilidad de estos materiales como

puzolanas, es decir, su capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua y mejorar las propiedades del hormigón.

La Tabla 1 muestra la variación de la resistencia a compresión del hormigón cuando se sustituyen parcialmente sus componentes tradicionales por ceniza de motacú y ceniza de castaña residual, tanto en hormigón tipo H-21 como H-25, en diferentes porcentajes de reemplazo (10%, 15% y 25%). En términos generales, se observa que la respuesta del hormigón ante la sustitución depende tanto del tipo de ceniza utilizada como del porcentaje de reemplazo y el tipo de hormigón.

Tabla 1. Variación porcentual de la resistencia a compresión según tipo de ceniza y nivel de sustitución. Datos obtenidos en los Laboratorios Generales C.I.C.-S.R.

Material	Hormigón	Sustitución (%)	Resistencia (kg/cm ²)	Δ % vs Ref
Ceniza de Motacú	H-21	10 %	199.81	-4.85 %
		15 %	201.76	-3.92 %
		25 %	197.80	-5.81 %
	H-25	10 %	207.21	-17.12 %
		15 %	188.18	-24.73 %
		25 %	219.43	-12.23 %
Ceniza de castaña residual	H-21	10 %	265.75	+26.55 %
		15 %	223.59	+6.47 %
		25 %	151.06	-28.07 %
	H-25	10 %	254.88	+1.95 %
		15 %	249.84	-0.06 %
		25 %	221.99	-11.20 %

Los resultados obtenidos indican diferencias significativas entre ambos materiales. Las cenizas del motacú, en todas las proporciones evaluadas, mostraron una resistencia a compresión por debajo de los estándares requeridos, lo que sugiere una baja reactividad puzolánica. En el hormigón H-21, la resistencia alcanzada con sustituciones del 10%, 15% y

25% fue de 199.81 kg/cm², 201.76 kg/cm² y 197.80 kg/cm², todas por debajo del requisito de 210 kg/cm². En el hormigón H-25, las resistencias alcanzadas fueron de 207.21 kg/cm², 188.18 kg/cm² y 219.43 kg/cm², lejos del mínimo exigido de 250 kg/cm². Este comportamiento podría estar influenciado por factores como su composición química o el proceso de

calcinación empleado, lo que limita su aplicación como sustituto del cemento en hormigones estructurales.

Por otro lado, las cenizas de la castaña residual demostraron un comportamiento más favorable. En el hormigón H-21, las proporciones del 10% y 15% no solo cumplieron con los estándares, sino que lograron mejorar la resistencia a compresión en comparación con la mezcla convencional, alcanzando valores de 265.75 kg/cm² (26.5% por encima del estándar) y 223.59 kg/cm² (6.4% por encima del estándar). No obstante, la proporción del 25% mostró una disminución del 28%, con un valor de 151.06 kg/cm². En el hormigón H-25, solo la proporción del 10% cumplió con los valores exigidos, logrando una resistencia de 254.88 kg/cm² (1.95% por encima del estándar), mientras que las concentraciones del 15% y 25% resultaron insuficientes, con 249.84 kg/cm² y 221.99 kg/cm², respectivamente. Este fenómeno sugiere que, aunque la castaña residual posee características puzolánicas favorables, su incorporación en exceso podría afectar la cohesión de la mezcla y, en consecuencia, su desempeño estructural.

En términos de sostenibilidad, este trabajo aporta una contribución valiosa al promover la reutilización de residuos locales en la industria de la construcción, lo que puede reducir la dependencia del cemento Portland y disminuir la huella ambiental del hormigón. Además, abre nuevas líneas de investigación orientadas a mejorar las propiedades de las cenizas del motacú mediante técnicas avanzadas de procesamiento o combinaciones con otros materiales puzolánicos (Beuntner *et al.*, 2019).

DISCUSIÓN

Para el caso de la ceniza de motacú, en el hormigón H-21, la resistencia a compresión disminuye

ligeramente a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, pasando de 199.81 kg/cm² a 197.80 kg/cm², lo que representa una reducción porcentual de entre -3.92 % y -5.81 % respecto al valor de referencia. En el hormigón H-25, la disminución es más marcada, especialmente al 15 % de sustitución, donde la resistencia disminuye hasta 188.40 kg/cm², lo que implica una reducción de -24.73 %. Sin embargo, al 25 % de sustitución, la resistencia mejora levemente respecto al 15 %, alcanzando 201.47 kg/cm², aunque aún está por debajo del valor de referencia con una variación de -12.23 %.

Esto sugiere que el efecto negativo de la ceniza de motacú sobre la resistencia es más pronunciado en hormigones de mayor resistencia inicial (H-25), pero que existe cierta recuperación al aumentar la sustitución, posiblemente por una mejor integración de la ceniza en la matriz del hormigón a mayores porcentajes. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Moawad *et al.* (2023), quienes observaron que las puzolanas naturales de baja reactividad tienden a disminuir la resistencia inicial, aunque pueden mejorar la cohesión en edades mayores.

En contraste, la ceniza de castaña residual muestra un comportamiento diferente. En el hormigón H-21, la resistencia a compresión inicialmente aumenta de manera significativa al 10 % y 15 % de sustitución, alcanzando 251.98 kg/cm² (+26.55 %) y 223.59 kg/cm² (+6.47 %), respectivamente, lo que indica un efecto positivo de la incorporación de este residuo en bajas proporciones. Sin embargo, al 25 % de sustitución, la resistencia disminuye drásticamente a 151.06 kg/cm² (-28.07 % respecto al valor de referencia). Esto sugiere que existe un umbral óptimo de sustitución, y que superar el 15 % puede resultar perjudicial para la resistencia del hormigón. Resultados

similares fueron reportados por Mohsen *et al.* (2023), quienes demostraron que reemplazos moderados de cemento por cenizas naturales o de residuos agrícolas ($\leq 15\%$) pueden mejorar la microestructura y reducir la permeabilidad del hormigón, mientras que porcentajes más altos provocan pérdida de compactación y fallas intergranulares (Olaiya *et al.* 2025).

En el caso del hormigón H-25, la tendencia es más estable: la resistencia se mantiene prácticamente igual al valor de referencia en el 10 % y 15 % de sustitución (254.88 kg/cm² y 249.84 kg/cm², con variaciones de +1.95 % y -0.06 %, respectivamente), pero disminuye a 221.99 kg/cm² (-11.20 %) al 25 % de sustitución. Esta tendencia confirma lo indicado por Olaiya *et al.* (2025), quienes afirman que el desempeño de las puzolanas depende no solo del contenido de sílice amorfa, sino también del tamaño de partícula y del control térmico durante la calcinación (Meddah *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva operativa, los resultados indican que solo las cenizas de castaña residual, en proporciones moderadas, podrían integrarse en la producción de hormigones H-21 y H-25 sin comprometer los tiempos de curado ni los procesos de vibrado y moldeo en obra. Esto es válido siempre y cuando se establezcan protocolos claros para su manejo: recolección, transporte y almacenamiento deben realizarse en condiciones secas y limpias para evitar contaminación con tierra o residuos orgánicos que deterioren las propiedades de la ceniza (Mohsen *et al.*, 2023).

Asimismo, la calcinación debe llevarse a cabo a una temperatura controlada, entre 600 y 800° C, durante un tiempo suficiente para eliminar materia orgánica y favorecer la formación de sílice amorfa, pero

sin llegar a cristalizar el cuarzo, que es menos reactivo. En la práctica, esto podría implicar la construcción de hornos locales cerca de las plantaciones de castaña, con sistemas de medición de temperatura y cronómetros para garantizar homogeneidad (Olaiya *et al.*, 2025). Si estas instalaciones estuvieran vinculadas a plantas de hormigón premezclado, se reducirían los costos de transporte y se fomentaría la economía circular en un radio de acción local.

Las cenizas de castaña residual, al superar apenas los estándares en un 10 % de sustitución, demuestran que el aprovechamiento de subproductos agrícolas puede reducir parcialmente la huella de carbono del hormigón, ahorrando kilos de CO₂ por metro cúbico de mezcla y minimizando la extracción de materias primas. Según Mohsen *et al.* (2023) y Olaiya *et al.* (2025), si la distancia entre el punto de calcinación y la planta es grande o si los volúmenes de cáscara no son constantes durante todo el año, por tanto, los beneficios económicos y ambientales podrían diluirse (Moawad *et al.*, 2023).

De esta forma, cada residuo agrícola encontraría su nicho de aplicación óptimo: la castaña residual como puzolán parcial en hormigones estructurales y el motacú en productos de baja exigencia, contribuyendo al desarrollo de una construcción más responsable y eficiente (Moawad *et al.*, 2023).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”, y en particular a la Facultad de Ingeniería y Tecnología, por brindar el espacio académico y la infraestructura necesaria para la realización de esta investigación como

parte del desarrollo de tesis de pregrado en Ingeniería Civil.

Se reconoce la colaboración del laboratorio de materiales de construcción por permitir el uso de equipos y espacios para los ensayos de resistencia a compresión y la caracterización de las puzolanas. Asimismo, se agradece a los extractivistas locales de motacú (*Attalea phalerata*) y Beneficiadoras Urkupiña y Santa Isabel de castaña (*Bertholletia excelsa*) por facilitar el acceso a los residuos agroindustriales necesarios para el estudio.

Este trabajo fue posible gracias a los recursos propios de los estudiantes, incluyendo materiales, transporte y apoyo logístico, demostrando la viabilidad de realizar investigaciones académicas con fondos limitados pero con compromiso y planificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. 2019. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM C136-19. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/C136.htm>
- Beuntner, N.; Kustermann, A. & Thienel, K.-C. 2019. Pozzolanic potential of calcined clay in high-performance concrete. International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019). New Generation of Construction Materials. Rovinj, Croatia.
- Deboucha, W.; Leklou, N.; Khelidj, A. Oudjit, M.N. 2017. Natural pozzolana addition effect on compressive strength and capillary water absorption of Mortar. *Energy Procedia* 139: 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.273>
- Fragoso Doria, J.A. & Visbal Jacome, J.E. 2021. El uso de la puzolana de origen natural en concreto hidráulico. Tesis de grado en ingeniería civil.
- Universidad de Cartagena. Cartagena, Bolívar, Colombia.
- Meddah, M.S.; Owaisi, M.A.; Abedi, M. & Hago, A.W. 2023. Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*. 393: 132098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132098>
- Moawad, M.S.M.; Ragab, A.E. & Younis, S. 2023. Effect of the natural pozzolanic basalt on high-strength concrete. *Mansoura Engineering Journal* 48(2): 1–16. <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3063>
- Mohsen, M.O.; Aburumman, M.O.; Al Diseet, M.M.; Taha, R.; Abdel-Jaber, M.; Senouci, A. & Abu Taqa, A. 2023. Fly ash and natural pozzolana impacts on sustainable concrete permeability and mechanical properties. *Buildings* 13(8): 1927. <https://doi.org/10.3390/buildings13081927>
- Olaiya, B.C.; Lawan, M.M.; Olonade, K.A., & Segun, O.O. 2025. An overview of the use and process for enhancing the pozzolanic performance of industrial and agricultural wastes in concrete. *Discover Applied Sciences* 7: 164. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06586-1>
- Ramos Galarza, C. 2021. Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica* 10(1): 1–7. <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>