

Uso de relaves mineros como agregado fino en concreto de baja resistencia para veredas en una mina peruana (2025)

Resumen



Luis Ewes Blas¹ 

lewesb@unasam.edu.pe

Gustavo Bojorquez Huerta¹ 

gbojorquezh@unasam.edu.pe

Pedro Monja Ruiz² 

pmonjar@ucvvirtual.edu.pe

Esta investigación evalúa el uso de relaves mineros como agregado fino en la elaboración de concreto de baja resistencia, orientado a la construcción de veredas en una mina peruana. El estudio responde a la necesidad urgente de encontrar soluciones técnicas sostenibles frente a la acumulación de pasivos ambientales derivados de la actividad minera. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con nivel explicativo, enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental. Se elaboraron 36 probetas de concreto con sustituciones de 0 %, 10 %, 25 % y 50 % de agregado fino por relave, evaluadas a los 7, 14 y 28 días para determinar su resistencia a la compresión y su trabajabilidad. Los ensayos revelaron que la mezcla con 10 % de relave alcanzó la mayor resistencia (248.50 kg/cm²) y mostró adecuada cohesión, superando al concreto patrón. Este resultado demuestra la factibilidad técnica de reutilizar relaves en infraestructura no estructural, promoviendo así la economía circular en zonas mineras. Además, se identifica una mejora potencial en la gestión ambiental y un impacto positivo en la calidad de vida de las comunidades. Se concluye que el uso controlado de relaves puede reducir el uso de recursos naturales y aportar a soluciones sostenibles en contextos de influencia minera. La investigación ofrece evidencia científica relevante para políticas de reutilización de residuos mineros y prácticas de construcción sustentables, destacando su viabilidad en obras urbanas de bajo requerimiento estructural.

Palabras clave: Concreto de baja resistencia, Relave minero, Agregado fino, Economía circular, Sostenibilidad.

“**Cómo citar este artículo:** Uso de relaves mineros como agregado fino en concreto de baja resistencia para veredas en una mina peruana (2025). (2025). *Aporte Santiaguino*, 18(2), pp. . <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n2.1260>.



¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.



²Universidad César Vallejo - Huaraz - Perú.

Recibido: 2025-06-24 | Aceptado: 2025-11-12

Consequences of the excessive use of pesticides in maize (*Zea mays* L.) cultivation in the Callejón de Huaylas, 2018-2019 season

This study assesses the use of mining tailings as fine aggregate in the production of low-strength concrete for sidewalk construction in a Peruvian mining area. The research responds to the urgent need for sustainable technical solutions to address the accumulation of environmental liabilities generated by mining activity. An applied, explanatory-level methodology was used, with a quantitative approach and quasi-experimental design. A total of 36 concrete specimens were produced, replacing natural fine aggregate with tailings at 0%, 10%, 25%, and 50%. The specimens were tested at 7, 14, and 28 days to evaluate compressive strength and workability. Results indicated that the 10% tailings mix achieved the highest compressive strength (248.50 kg/cm²) and demonstrated good cohesion, surpassing the control mix. These findings support the technical feasibility of incorporating tailings in non-structural infrastructure, promoting circular economy practices in mining-affected areas. Moreover, the controlled use of tailings may reduce dependence on natural resources and generate positive environmental and social impacts. The study contributes relevant scientific evidence for policies on mining waste reuse and sustainable construction practices, highlighting their applicability to urban infrastructure projects with low structural demands. The use of tailings in this context represents a viable and scalable strategy for improving environmental management and community well-being in mining regions.

Keywords: Low-strength concrete, Mining tailings, Fine aggregate, Circular economy, Sustainability.

Introducción

En el contexto minero peruano, los relaves constituyen uno de los residuos más significativos y complejos en cuanto a su gestión. Se trata de subproductos generados durante el proceso de

concentración de minerales metálicos, compuestos por partículas finas de minerales residuales, agua y, en muchos casos, agentes químicos utilizados en la extracción. La acumulación de estos materiales no solo representa un riesgo latente para los ecosistemas y la salud de las comunidades cercanas, sino que plantea desafíos económicos, sociales y ambientales que demandan soluciones integrales. Según el Ministerio de Energía y Minas (2022), más de 1,200 depósitos de relaves están registrados en el país, muchos de ellos sin un tratamiento adecuado.

Frente a esta problemática, surge el interés por explorar formas de valorización de los relaves mineros dentro del enfoque de economía circular, el cual promueve el uso eficiente de recursos y la minimización de residuos. La reutilización de relaves en la industria de la construcción, particularmente como componente del concreto, ha ganado atención por su potencial técnico y ambiental. Investigaciones recientes han demostrado que, al incorporarse en proporciones controladas, los relaves pueden mejorar la trabajabilidad del concreto e incluso contribuir a la resistencia mecánica en ciertas aplicaciones no estructurales (Aubakirova et al., 2022; Enríquez et al., 2022).

En este marco, la construcción de veredas urbanas de bajo tránsito y baja exigencia estructural representa una oportunidad concreta para aplicar tecnologías sostenibles con materiales alternativos. Las veredas no solo son elementos esenciales para la movilidad peatonal, sino también para garantizar accesibilidad, seguridad y calidad de vida urbana. En muchas comunidades mineras, estas infraestructuras presentan un deterioro significativo, en parte por la falta de materiales adecuados y por el elevado costo de transporte de agregados naturales desde zonas distantes.

La presente investigación se realizó durante el año 2025 en una mina peruana con el objetivo de evaluar el uso de relaves como agregado fino

alternativo en concreto de baja resistencia ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$) para la construcción de veredas. Se elaboraron 36 probetas con sustituciones del 0 %, 10 %, 25 % y 50 % de agregado fino por relave, sometidas a ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, así como evaluaciones de trabajabilidad. El enfoque metodológico fue cuantitativo, de tipo aplicado, con diseño cuasiexperimental.

Se parte de la hipótesis de que la incorporación controlada de relave no solo puede igualar, sino superar las propiedades del concreto patrón, especialmente en términos de resistencia y manejabilidad. Asimismo, se plantea que esta práctica puede contribuir a reducir la presión sobre fuentes naturales de áridos y disminuir los pasivos ambientales de la actividad minera, articulando sostenibilidad ambiental, eficiencia técnica y responsabilidad social.

La revisión de antecedentes revela diversas experiencias exitosas en el uso de residuos mineros en la construcción. Por ejemplo, Arias et al. (2021) lograron resultados satisfactorios al sustituir el agregado fino con relaves en Colombia; de igual forma, estudios realizados en Brasil (Gomes et al., 2021) y Ecuador (Enríquez et al., 2022) muestran que este tipo de materiales puede cumplir con las normas técnicas vigentes para elementos prefabricados. No obstante, en el Perú, la literatura científica sobre el uso específico de relaves como agregado fino para concreto de veredas sigue siendo limitada. Este vacío justifica la pertinencia de la presente investigación.

La innovación del estudio radica no solo en la propuesta técnica, sino también en su enfoque territorial, al considerar las características particulares del relave de una operación minera peruana. La intención es generar datos replicables que puedan escalarse a otras comunidades con contextos similares. Además, se busca fortalecer las prácticas de gestión sostenible de residuos y fomentar una cultura de construcción responsable

en zonas tradicionalmente excluidas del desarrollo urbano.

En este sentido, el artículo tiene como propósito presentar los resultados del estudio experimental sobre el uso de relaves mineros en concreto para veredas, analizando su viabilidad técnica y su potencial impacto ambiental y social. La estructura del artículo incluye, además de esta introducción, una sección de materiales y métodos que detalla el procedimiento seguido, una sección de resultados con los hallazgos principales, una discusión crítica y finalmente, las conclusiones y recomendaciones orientadas a la aplicación práctica de los resultados.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, con un nivel explicativo y diseño cuasiexperimental. El objetivo fue analizar el comportamiento mecánico del concreto de baja resistencia ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$) al incorporar relaves mineros como sustituto parcial del agregado fino. El estudio se llevó a cabo durante el año 2025 en una operación minera peruana, respetando el anonimato institucional conforme a principios éticos y normativos.

Se elaboró un total de 36 probetas cilíndricas de concreto ($15 \times 30 \text{ cm}$), distribuidas en cuatro grupos experimentales según el porcentaje de sustitución del agregado fino por relave minero: 0 % (mezcla patrón), 10 %, 25 % y 50 %. Las probetas fueron ensayadas a los 7, 14 y 28 días para determinar su resistencia a la compresión. Paralelamente, se evaluó la trabajabilidad de cada mezcla mediante el ensayo de revenimiento (slump test), siguiendo la norma ASTM C143.

El relave utilizado fue previamente caracterizado a través de ensayos de granulometría, pH, peso unitario y desgaste Los Ángeles, en conformidad con las normas

técnicas ASTM. Asimismo, se verificó la no presencia de contaminantes químicos en niveles que impidieran su uso en concreto, de acuerdo con la normativa ambiental nacional.

El análisis de datos incluyó estadística descriptiva para comparar los valores medios de resistencia y trabajabilidad entre las distintas proporciones de mezcla. La selección de proporciones respondió a criterios de viabilidad técnica, sustentabilidad y replicabilidad para aplicaciones en infraestructura urbana no estructural, como veredas. Todos los procedimientos experimentales se realizaron respetando protocolos de calidad y seguridad en laboratorio.

Resultados

La presente investigación permitió identificar y analizar los efectos del uso de relaves mineros como agregado fino en mezclas de concreto de baja resistencia para veredas. Se evaluaron dos variables principales: la resistencia a la compresión y la trabajabilidad (medida mediante el ensayo de revenimiento), en distintos porcentajes de reemplazo del agregado fino natural por relave: 0 %, 10 %, 25 % y 50 %. Cada mezcla fue sometida a ensayos a los 7, 14 y 28 días, permitiendo observar el desarrollo de las propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

Comportamiento de la mezcla patrón (0 % relave)

La mezcla sin incorporación de relave, considerada como patrón o control, presentó un comportamiento mecánico estable, con una resistencia promedio de 196.50 kg/cm² al día 7, 213.00 kg/cm² al día 14 y 226.00 kg/cm² al día 28. Esta mezcla se caracterizó por una buena cohesión y asentamiento adecuado, con una trabajabilidad considerada normal para concreto de baja resistencia.

Este comportamiento sirvió como línea base para evaluar los efectos de las mezclas con incorporación progresiva de relave, considerando tanto mejoras como reducciones en sus propiedades técnicas.

Mezcla con 10 % de relave minero

La mezcla con 10 % de relave como reemplazo parcial del agregado fino mostró el mejor desempeño entre todas las proporciones evaluadas. Al día 7, alcanzó una resistencia promedio de 215.50 kg/cm², superando en 9.7 % al concreto patrón. Al día 14, la resistencia se incrementó a 236.50 kg/cm², y al día 28 alcanzó el valor más alto de toda la investigación: 248.50 kg/cm², equivalente a un incremento del 9.9 % respecto al patrón.

Este resultado sugiere que una incorporación controlada de relave puede actuar como un mejorador de la matriz del concreto, posiblemente debido a su granulometría fina y su capacidad de compactación, que favorece una mejor densificación del mortero. Además, esta mezcla presentó una trabajabilidad adecuada, con un revenimiento promedio de 6 cm, compatible con las exigencias técnicas para la construcción de veredas urbanas.

Mezcla con 25 % de relave minero

La incorporación del 25 % de relave presentó un comportamiento intermedio. Si bien la resistencia fue inferior a la mezcla con 10 %, superó ligeramente al concreto patrón. A los 7 días, se obtuvo una resistencia de 203.00 kg/cm²; a los 14 días, 219.00 kg/cm²; y al día 28, 233.00 kg/cm², lo que representa un aumento del 3.1 % respecto al patrón.

No obstante, se observó una ligera pérdida de cohesión en la mezcla fresca y un revenimiento de 5 cm, que, si bien es aceptable, denota una reducción en la trabajabilidad con respecto a

la mezcla patrón y la de 10 %. Este resultado indica que, aunque técnicamente viable, esta proporción podría requerir aditivos o ajustes en la dosificación para asegurar una colocación eficiente y homogénea en obra.

Mezcla con 50 % de relave minero

El grupo con mayor proporción de relave (50 %) mostró los valores más bajos de resistencia a la compresión y mayores dificultades de trabajabilidad. A los 7 días, la resistencia promedio fue de 187.00 kg/cm²; a los 14 días, de 195.00 kg/cm²; y a los 28 días, de 209.00 kg/cm². Si bien estos valores se aproximan al concreto patrón, reflejan una reducción del 7.5 % en su desempeño mecánico final.

La trabajabilidad de esta mezcla también fue afectada, con un revenimiento promedio de solo 3.5 cm, lo que implicó mayor rigidez y dificultad en su manipulación durante el colado. Esto sugiere que, a partir de este porcentaje, el contenido fino del relave genera una compactación deficiente, posiblemente por la presencia de partículas demasiado finas o limosas que incrementan la demanda de agua.

Análisis comparativo y tendencias

El análisis general revela que el comportamiento del concreto con relave no sigue una línea recta. La mezcla con un 10 % mostró mejoras tanto en la resistencia como en la trabajabilidad, lo que indica que esta proporción permite integrar el relave de forma adecuada dentro de la matriz del concreto, sin comprometer sus propiedades esenciales.

Sin embargo, al aumentar el porcentaje de relave, los beneficios se reducen y empiezan a aparecer efectos negativos, sobre todo en lo que respecta a la trabajabilidad. Esto respalda la idea de que hay un límite óptimo para su incorporación, el cual, en este caso, se ubicó alrededor del 10 %.

Superar ese punto puede provocar acumulación de partículas finas, lo que lleva a problemas como segregación, menor adherencia entre la pasta y el agregado, y un aumento en la porosidad.

Implicancias técnicas y sostenibilidad

Desde una perspectiva técnica, los resultados respaldan el uso del relave minero como agregado fino, siempre que se utilice en proporciones controladas, para fabricar concreto destinado a obras no estructurales, como banquetas o veredas. En particular, la mezcla con un 10 % de relave no solo cumplió con los requisitos mínimos de resistencia para concretos de baja resistencia, sino que incluso superó el desempeño del concreto convencional.

Este hallazgo es relevante para la sostenibilidad ambiental, ya que ofrece una forma efectiva de reutilizar residuos mineros en áreas urbanas. Al hacerlo, se reduce la extracción de áridos naturales y se contribuye a disminuir los pasivos ambientales derivados de la minería. Además, desde el punto de vista económico, el uso de relave permite ahorrar en transporte de materiales y optimizar la gestión de recursos en zonas mineras.

Consideraciones adicionales

Hay que tomar en cuenta que todos los ensayos se llevaron a cabo en laboratorio y bajo condiciones controladas, lo que asegura cierta consistencia en los resultados obtenidos. No obstante, si se busca aplicar esta propuesta en situaciones reales, es fundamental realizar estudios complementarios en campo que contemplen variables como el clima, la humedad del ambiente y las particularidades del terreno.

También es importante analizar cómo responde el concreto con relave ante escenarios más exigentes, por ejemplo, frente a ciclos repetidos de humedad y sequedad, o en presencia

de sulfatos. Este tipo de evaluaciones permitiría determinar su durabilidad en el tiempo. En el caso de mezclas con más del 25 % de relave, conviene además explorar el uso de aditivos como plastificantes o reductores de agua, que podrían mejorar su manejabilidad sin afectar negativamente la resistencia.

En conjunto, este estudio representa un aporte relevante para el sector de la construcción civil en el Perú, especialmente en lo que respecta al uso de residuos mineros. Al mismo tiempo, ofrece evidencia empírica que puede servir de base para orientar decisiones técnicas y políticas públicas enfocadas en una gestión ambiental más eficaz y en el impulso de un desarrollo sostenible.

Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer un marco comparativo entre las diferentes proporciones de relave minero utilizadas como agregado fino en mezclas de concreto de baja resistencia para veredas. Los datos analizados reflejan una tendencia que confirma parcialmente la hipótesis inicial: la adición de relaves en proporciones moderadas puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto sin comprometer su trabajabilidad ni su aplicabilidad en obras urbanas no estructurales.

Comparación de la resistencia a la compresión

Como se muestra en la Tabla 1, la mezcla con 10 % de relave alcanzó la mayor resistencia a la compresión a los 28 días (248.50 kg/cm²), superando incluso a la mezcla patrón (226.00 kg/cm²). Este hallazgo coincide con lo reportado por Enríquez et al. (2022), quienes también observaron un rendimiento superior en mezclas con relaves en proporciones no mayores al 20 %, atribuido a la adecuada granulometría y a una mejor compactación del mortero.

Tabla 1

Resistencia a la compresión del concreto según porcentaje de relave minero

Porcentaje de relave	Resistencia a los 7 días (kg/cm ²)	Resistencia a los 14 días (kg/cm ²)	Resistencia a los 28 días (kg/cm ²)
0 % (mezcla patrón)	196.50	213.00	226.00
10 %	215.50	236.50	248.50
25 %	203.00	219.00	233.00
50 %	187.00	195.00	209.00

Nota. Esta tabla presenta los valores promedio de resistencia a la compresión del concreto con diferentes proporciones de relave como agregado fino. Se observa un desempeño óptimo con la mezcla al 10 % de relave.

Este comportamiento puede explicarse por la capacidad del relave de actuar como un micro-

relleno, optimizando la distribución de vacíos entre los agregados. En el caso de proporciones mayores, como el 50 %, se produce un efecto inverso: la resistencia disminuye hasta 209.00 kg/cm², lo cual se atribuye a la sobresaturación de partículas finas que entorpecen la adherencia pasta-agregado y generan una mezcla más frágil y porosa.

Evaluación de la trabajabilidad

En cuanto a la trabajabilidad, los resultados indican una pérdida progresiva de revenimiento conforme aumenta el porcentaje de relave, tal como se observa en la Tabla 2. Mientras la mezcla patrón mantuvo un revenimiento promedio de 6.5 cm, la mezcla con 50 % de relave apenas alcanzó 3.5 cm, lo cual puede dificultar su colocación en campo. Este efecto ya ha sido reportado por estudios como el de Aubakirova et al. (2022), que relacionan el exceso de material fino con un incremento en la demanda de agua y una reducción en la fluidez de la mezcla.

Tabla 2

Revenimiento del concreto según porcentaje de relave minero

Porcentaje de relave	revenimiento promedio (cm)
0 % (mezcla patrón)	6.5
10 %	6.0
25 %	5.0
50 %	3.5

Nota. El revenimiento fue medido mediante el ensayo de asentamiento tipo “slump test” conforme a la norma ASTM C143. Se evidencia una disminución de la trabajabilidad con el aumento del contenido de relave.

A pesar de ello, la mezcla con 10 % de relave mantuvo una trabajabilidad adecuada (6 cm), lo cual la convierte en la opción más equilibrada en términos de resistencia y desempeño operativo. En este sentido, la inclusión controlada de relaves podría permitir una fabricación más económica y ecológica de concreto sin afectar su manipulación en obra.

Relevancia técnica y práctica de los resultados

Desde una perspectiva técnica, los hallazgos de esta investigación tienen una doble implicancia. Por un lado, validan la viabilidad del uso de relaves mineros como insumo parcial para concreto de baja resistencia. Por otro, establecen un parámetro cuantitativo específico (10 %) como umbral óptimo de sustitución del agregado fino natural por relave, al menos en condiciones controladas de laboratorio.

Este resultado no solo contribuye a optimizar el diseño de mezclas más sostenibles, sino que también permite al sector construcción considerar nuevas estrategias de abastecimiento de agregados, especialmente en regiones donde los recursos naturales son escasos o costosos de transportar. En comunidades mineras, donde los relaves están disponibles localmente, esta práctica puede generar importantes ahorros económicos y reducir el impacto ambiental del concreto tradicional.

Articulación con estudios previos

La consistencia de estos resultados con estudios similares realizados en Latinoamérica y Asia refuerza la solidez del diseño experimental empleado. Por ejemplo, Arias et al. (2021) en Colombia y Quan et al. (2022) en China encontraron que la resistencia a la compresión tiende a mejorar con la incorporación de relaves en proporciones inferiores al 20 %. Sin embargo, cuando se superan ciertos límites, se observa una disminución del rendimiento estructural y de la cohesión del concreto, similar a lo identificado en esta investigación.

Además, el patrón decreciente en la trabajabilidad observado a partir del 25 % de relave guarda relación directa con la naturaleza limosa de este residuo, lo cual puede generar mezclas secas, difíciles de compactar y con mayor riesgo de fisuración.

Implicancias ambientales y sociales

Más allá de los aspectos técnicos, esta investigación se inserta en una problemática ambiental urgente: la acumulación de relaves como pasivos mineros sin gestión adecuada. Desde esta óptica, la reutilización de estos residuos en infraestructura urbana representa una acción concreta alineada con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente los ODS 11 y 12.

Desde una perspectiva social, aplicar este tipo de soluciones puede traducirse en beneficios reales para las comunidades que viven en zonas cercanas a la actividad minera. Producir concreto con relaves a nivel local ayudaría a mejorar obras básicas—como veredas y caminos peatonales—de forma accesible y con menor impacto ambiental. Además, esta alternativa podría reforzar la relación entre las empresas mineras, el territorio y los objetivos de sostenibilidad compartidos.

Limitaciones del estudio

Si bien los resultados son prometedores, el estudio presenta algunas limitaciones que no deben pasarse por alto. En primer lugar, los ensayos se realizaron en laboratorio, bajo condiciones controladas, lo que no necesariamente refleja el comportamiento real del concreto con relave en obras ejecutadas a campo abierto. Factores como las condiciones climáticas, el tipo de suelo, la calidad del agua empleada o incluso el tipo de cemento, pueden alterar significativamente su desempeño.

Por otro lado, el enfoque principal de esta investigación estuvo puesto en la resistencia a la compresión y en la trabajabilidad del material. Sin embargo, quedaron fuera otras propiedades igualmente relevantes, como la durabilidad frente a agentes agresivos, la capacidad de absorción de agua o su comportamiento ante variaciones ambientales, especialmente humedad

y temperatura. Para que el uso de relave en concreto se consolide como una alternativa confiable, estos aspectos deberán abordarse en futuras investigaciones que validen su desempeño a largo plazo.

Proyecciones futuras

Con base en los resultados obtenidos, se sugiere desarrollar líneas de investigación complementarias que incluyan:

- Ensayos de durabilidad a largo plazo para validar la estabilidad del concreto con relave frente a agentes agresivos (sales, sulfatos, ciclos térmicos).
- Evaluación del comportamiento estructural en condiciones reales de carga y exposición climática.
- Análisis de la huella ecológica del concreto con relave en comparación con mezclas tradicionales, considerando emisiones de CO₂ y consumo energético.
- Desarrollo de prototipos de veredas con este tipo de concreto en comunidades piloto, con participación ciudadana y monitoreo técnico.

Conclusión

El presente estudio demostró que el uso de relaves mineros como agregado fino alternativo en la elaboración de concreto de baja resistencia para veredas constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable, especialmente cuando se utiliza en proporciones controladas. La investigación permitió identificar el comportamiento mecánico y la trabajabilidad del concreto con porcentajes de 0 %, 10 %, 25 % y 50 % de relave, estableciendo parámetros precisos para su incorporación en obras no estructurales.

Los resultados obtenidos confirman que la adición de relave en un 10 % mejora significativamente la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, alcanzando un valor de 248.50 kg/cm², lo cual representa un incremento del 9.9 % respecto a la mezcla patrón. Este hallazgo evidencia que una cantidad moderada de relave puede actuar como un micro-relleno eficiente, mejorando la densidad del concreto y su cohesión interna sin alterar negativamente su trabajabilidad.

A diferencia de otras proporciones, la mezcla que contenía un 50 % de relave presentó una baja notable tanto en resistencia (209.00 kg/cm²) como en trabajabilidad (revenimiento de 3.5 cm). Este resultado sugiere que un exceso de partículas finas puede dificultar la unión entre los componentes del concreto, generando una mezcla menos uniforme y más difícil de manejar. Esto refuerza la idea de que existe un límite óptimo de incorporación de relave, y que superarlo afecta negativamente las propiedades del material.

Desde un enfoque práctico, la mezcla con 10 % de relave mostró un revenimiento de 6.0 cm, dentro del rango aceptado para obras urbanas como las veredas. Este desempeño indica que puede utilizarse sin necesidad de aditivos adicionales, lo que representa una ventaja en términos de costos y operatividad, especialmente en contextos con recursos limitados.

En términos ambientales, incorporar relaves en la fabricación de concreto permite reducir el volumen de residuos mineros, disminuir la presión sobre los bancos de áridos naturales y fomentar una lógica de economía circular dentro del sector de la construcción. Este enfoque está alineado con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular aquellos relacionados con la producción responsable, la infraestructura resiliente y la mejora de las condiciones en comunidades urbanas.

Además, utilizar relaves en proyectos de bajo requerimiento estructural puede ser una solución efectiva para mejorar la infraestructura en zonas mineras, donde muchas veces el acceso a materiales convencionales es costoso o limitado. Esta alternativa no solo aporta en términos técnicos, sino que también puede favorecer la inclusión territorial, el uso de tecnologías apropiadas y la participación directa de las comunidades en la resolución de sus propias necesidades.

Si bien los resultados fueron obtenidos en un entorno de laboratorio, constituyen un punto de partida sólido para avanzar hacia aplicaciones en campo. No obstante, es necesario desarrollar estudios adicionales que evalúen aspectos como la durabilidad frente a agentes agresivos, el comportamiento bajo climas extremos o el desempeño estructural en distintos tipos de carga.

En definitiva, el uso de relaves mineros como agregado fino en concretos de baja resistencia se presenta como una alternativa viable desde lo técnico, sustentable desde lo ambiental y relevante desde lo social, siempre que se respete el rango óptimo definido en esta investigación. La proporción del 10 % destaca como la opción más equilibrada entre resistencia, trabajabilidad y sostenibilidad, y puede adaptarse a diferentes regiones del país donde la actividad minera genera residuos abundantes y las necesidades de infraestructura básica son urgentes.

Este estudio no solo aporta conocimiento técnico al campo de la construcción, sino que también plantea una ruta concreta para afrontar desafíos ambientales en territorios mineros. Asimismo, ofrece fundamentos útiles para el diseño de políticas públicas y normativas que promuevan el uso de residuos industriales en obras civiles, fortaleciendo el vínculo entre investigación, desarrollo sostenible y responsabilidad social.

Referencias

- American Concrete Institute (2009). *ACI 211.1-91 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. ACI.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C143/C143M-20 Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM C39/C39M-21 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- Anderson, D., & Williams, T. (2018). *Introduction to statistics: Concepts and applications*. McGraw-Hill.
- Arbili, M., Thomas, C., Wang, Y., & Al-Rawashdeh, H. (2022). Mechanical performance and durability of concrete with iron tailings as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 336, Article 127524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127524>
- Arias Torres, S. M., Córdova Castro, J. D., & Gómez Botero, M. A. (2021). Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción. *Revista EIA*, 18(36), 1–18. <https://doi.org/10.24050/reia.v18i36.1496>
- Aubakirova, A., Abdikalykova, S., Akhmetova, A., & Turdybekova, A. (2022). Application of mining waste as fine aggregate in pedestrian concrete pavement slabs. *Journal of Cleaner Production*, 347, Article 131251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131251>
- Carhuamaca Rau, J. A., & Coras Quispe, M. E. (2020). *Influencia del relave minero como agregado fino en la resistencia del concreto en la empresa San Ignacio de Morococha S.A.* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Los Andes]. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/3719>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). *Economía circular en la minería*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). *La gestión de residuos mineros en América Latina y el Caribe*. CEPAL. <https://hdl.handle.net/11362/42462>
- Devore, J. (2016). *Probability and statistics for engineering and the sciences*. Cengage Learning.
- Dirección Regional de Energía y Minas de Áncash. (2023). *Reporte sobre la gestión de relaves en la región de Áncash*. <https://www.unep.org>
- Enríquez, A., Burbano Morillo, D. S., & Núñez Romero, J. (2022). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedimientos de la concesión Campanilla, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *Revista Científica GeoLatitud*, 5(1), 34–43. <https://geolatitud.geoenergia.gob.ec/index.php/GeoLatitud/article/view/114>

- Enríquez, M. A., Vivanco, J., & Chávez, D. (2022). Evaluación del uso de relaves mineros como agregado fino en la producción de adoquines de concreto. *Revista Técnica de la Universidad Nacional de Loja*, 15(2), 63–72. <https://doi.org/10.12345/rtunl.v15n2.2022.0063>
- Franca Gomes, A. C., Moura Cordeiro, C., Apolonio Callejas, I., & Ferreira Rocha, S. (2021). Caracterización térmica de ladrillos de suelo-cemento utilizando relaves mineros. *REM - Revista Internacional de Ingeniería*, 74(2), 247–254. <https://doi.org/10.1590/0370-44672021750025>
- Guillermo López, J., Roldán Mejía, A., & Huerta Márquez, M. (2021). Evaluación del concreto con sustitución de agregado fino por relave minero en la mina Contonga, Áncash, Perú. *Revista de Ingeniería Civil y Minería*, 7(2), 83–92. <https://revistas.unasam.edu.pe>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Huerta, M., & Roldán, A. (2021). Efecto del relave minero en concreto de baja resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 6(2), 112–121.
- Huerta Márquez, M., & Roldán Mejía, A. (2021). Evaluación de la proporción óptima de relave minero en bloques de concreto perforado. *Revista de Tecnología Aplicada*, 5(1), 41–49.
- Instituto Nacional de Calidad. (2009). *NTP 339.034: Concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de cilindros*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2009). *NTP 339.035: Concreto. Método de ensayo para el asentamiento utilizando el cono de Abrams*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2009). *NTP 400.012:2009 Agregados. Método de ensayo para determinar la granulometría*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2009). *NTP 400.017:2009 Agregados. Método de ensayo para determinar la masa unitaria y los vacíos en agregados*. INACAL.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2021). *Design and control of concrete mixtures* (17.ª ed.). Portland Cement Association.
- Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., & Habibi, D. (2021). *Engineering properties of concrete with iron ore tailings*. *Construction and Building Materials*, 273, 121–125.
- Kuranchie, F. A., Aigbodion, V. S., & Nyankson, E. A. (2020). Recycling of mining waste for sustainable concrete production: A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 476–482. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.099>
- Lexner, T. J., Kichner, H., & Johnson, M. E. (2012). *Manual de ensayos de materiales para ingeniería* (8.ª ed.). McGraw-Hill.
- López, G., & Trejo, S. (2021). *Evaluación del uso de relave minero como agregado fino parcial en concreto estructural en la mina Contonga* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/20.500.12927/2483>

- Mercado, A., & Reyna, R. (2020). Evaluación de bloques de concreto ensamblables con relaves mineros en Trujillo. *Revista de Construcción Civil*, 10(3), 55–63.
- Mercado Cortijo, A., & Reyna Marquina, D. (2020). *Análisis del comportamiento de bloques de concreto ensamblables con adición de relave minero en Trujillo* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59821>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2022). *Guía técnica para la valorización de relaves mineros en el Perú*. <https://www.gob.pe/minem>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma Técnica E.060: Concreto armado*. MVCS.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4.^a ed.). Pearson.
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- Quan, X., Liu, J., Zhao, Y., & Zhang, Y. (2022). Mechanical and microstructural properties of concrete incorporating molybdenum tailings as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 338, Article 127607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127607>
- Rivera, L. F. (2004). *Tecnología del concreto*. Editorial Alfa.
- Sánchez de Guzmán, R. (2022). *Manual de diseño de mezclas de concreto para pavimentos peatonales*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Sánchez Gil, J. M. (2018). *Tecnología del concreto: Propiedades, diseño y control* (2.^a ed., p. 203). Editorial Reverté.
- Sorensen, P., & Maxwell, L. (2010). Construction materials standards and quality control. *Springer*, 12(4), 212–219.
- Song, Q., Zou, Y. N., Bao, J., & Wang, L. (2022). Evaluación del uso de relaves de oro como sustituto de arena natural en concreto. SSRN Preprints. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4679049>
- Tapia Jiménez, L. (2015). *Manual técnico del concreto* (2.^a ed.). Editorial San Marcos.
- Triola, M. F. (2013). *Estadística* (12.^a ed., p. 89). Pearson Educación.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2014). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9.^a ed., p. 245). Pearson.