

## Tecnología de adecuación de relaves para su uso como materia prima en la producción de Cemento

Tailings adaptation technology for use as a raw material in cement production

Edelink Tinoco <sup>1,\*</sup> ; Marco Ojeda <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento de Innovación, Nexa Resources, Circunvalación del Club Golf lo Incas 170, Surco, Lima, Perú.  
ext.marco.antonio@contratistas.com.pe

\* Autor correspondiente: [edelink.tinoco@nexaresources.com](mailto:edelink.tinoco@nexaresources.com) (E. Tinoco) DOI: [10.17268/rev.cyt.2024.04.10](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.04.10)

### RESUMEN

Este estudio analiza la viabilidad técnica de utilizar los relaves mineros de la empresa Nexa Resources como materia prima para la producción de cemento, promoviendo un enfoque de economía circular. La metodología incluye el acondicionamiento de los relaves mediante flotación, tratamiento térmico para la producción de clinker, y su posterior molienda. Se optimizó un circuito de flotación seleccionando reactivos específicos, como colectores de carbonatos y depresores de sílice, lo que permitió incrementar el contenido de carbonatos y reducir los niveles de sílice y piritita. Esto garantizó las proporciones adecuadas de Ca, Si, Al y Fe necesarias para mantener la calidad del clinker. A escala piloto, se produjeron más de 5 toneladas de clinker, obteniendo un cemento que cumple con los estándares de un cemento Portland. Este cemento fue probado con éxito en aplicaciones de shotcrete y relleno en pasta, cumpliendo los requisitos de resistencia a la compresión y absorción de energía. Los resultados confirman la viabilidad técnica de producir cemento de alta calidad a partir de relaves mineros, representando un avance hacia la sostenibilidad en la industria minera al ofrecer soluciones para la gestión de residuos y la reducción de la huella ambiental.

**Palabras clave:** Relave minero; Flotación de Carbonatos; Clíinker; Cemento; Economía Circular.

### ABSTRACT

This study analyzes the technical feasibility of using mining tailings from Nexa Resources as raw material for cement production, promoting a circular economy approach. The methodology includes conditioning the tailings through flotation, thermal treatment for clinker production, and subsequent grinding. A flotation circuit was optimized by selecting specific reagents, such as carbonate collectors and silica depressants, which increased the carbonate content and reduced silica and pyrite levels. This ensured the appropriate proportions of Ca, Si, Al, and Fe required to maintain clinker quality. At a pilot scale, more than 5 tons of clinker were produced, resulting in cement that meets the standards of Portland cement. This cement was successfully tested in shotcrete and paste fill applications, meeting the requirements for compressive strength and energy absorption. The results confirm the technical feasibility of producing high-quality cement from mining tailings, representing a significant step toward sustainability in the mining industry by providing solutions for waste management and reducing the environmental footprint.

**Keywords:** Mining Tailings; Carbonate Flotation; Clinker; Cement; Circular Economy.

### 1. INTRODUCCIÓN

La economía circular en la minería se presenta como un enfoque transformador para una industria históricamente asociada con la explotación de recursos no renovables. Este modelo propone cerrar los ciclos de producción, minimizar los residuos y optimizar el uso de recursos, alineándose con los desafíos ambientales y económicos actuales del sector (Kretschmann & Krause, 2023).

En la actualidad, la industria minera enfrenta retos significativos, incluyendo la generación de grandes volúmenes de residuos, como los relaves, y su impacto ambiental. Estos desechos no solo plantean problemas de almacenamiento a largo plazo, sino que también representan una oportunidad subutilizada para la creación



de valor mediante su reintroducción en procesos productivos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2022). Adicionalmente, la demanda intensiva de materiales como el cemento, clave en operaciones mineras subterráneas, incrementa la huella ambiental del sector debido a su alta intensidad energética y de emisiones (Deolalkar, 2016; Bhatti et al., 2004).

Aunque investigaciones previas han explorado la reutilización de relaves en aplicaciones como materiales de construcción, aún existe un vacío significativo en el entendimiento de su transformación en productos de alto valor, como el cemento tipo Portland (Gou et al., 2019). Específicamente, se requiere mayor evidencia técnica que valide su viabilidad a escalas piloto e industrial, incluyendo aspectos como el control de composiciones químicas y propiedades mecánicas (Wang et al., 2019; Nastac & Fechet, 2017; Zhou et al., 2007; Luo et al., 2016; He et al., 2015).

En este contexto, el presente estudio busca demostrar la viabilidad técnica de transformar relaves mineros de la Unidad Minera El Porvenir en cemento de alta calidad para aplicaciones de shotcrete y relleno en pasta. El proyecto, desarrollado por Nexa Resources, se alinea con los principios de economía circular, mostrando cómo los residuos pueden convertirse en insumos valiosos y sostenibles. De esta manera, se contribuye a reducir el impacto ambiental del sector y a fomentar la eficiencia en el uso de recursos (Kretschmann & Krause, 2023; Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2022).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Caracterización del relave

En la etapa inicial del estudio se llevaron a cabo pruebas de laboratorio utilizando muestras representativas de relave recolectadas en intervalos de tiempo a lo largo de toda la evaluación. Estas muestras fueron sometidas a una caracterización física y química completa para garantizar su representatividad y precisión en el análisis.

El análisis del relave identificó minerales clave como calcita, cuarzo, pirita y feldespato, los cuales representan las principales fuentes de Ca, Si, Fe y Al, elementos esenciales para la producción de clinker. La caracterización mineralógica se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados se resumen en la Tabla 1.

Además, la composición química del relave fue determinada mediante fluorescencia de rayos X (FRX), expresando los compuestos en forma de óxidos, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Caracterización mineralógica del relave mediante DRX

Nombre del mineral	Fórmula general	%
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	40
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	14
Feldespato -K (Ortoclasa)	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7
Piroxeno (Diopsido)	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5
Pirita	FeS <sub>2</sub>	6
Granate (Grosularia)	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	5
Wollastonita	CaSiO <sub>3</sub>	4
Granate (Andradita)	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	4
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3
Apatito	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)	2

**Tabla 2.** Caracterización química del relave mediante FRX

Compuesto	%
CaO	26,60
SiO <sub>2</sub>	29,33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,85
MgO	2,95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,47
K <sub>2</sub> O	0,76

Compuesto	%
PF1	8,90
FSC2	28,00

## 2.2 Evaluaciones preliminares

### 2.2.1 Acondicionamiento del relave

Con el objetivo de optimizar las proporciones de los óxidos principales presentes en el relave (CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y controlar el factor de saturación de cal (FSC) cercano a 100, se realizaron investigaciones en colaboración con la Universidad Pontificia Católica de Rio de Janeiro,

Los resultados confirmaron que la flotación es la tecnología más adecuada para la concentración de carbonatos. Sin embargo, se identificó la necesidad de implementar dos etapas previas al proceso: (1) deslamado del relave, para eliminar partículas finas (<20 μm) que afectan la eficiencia del proceso, y (2) flotación de minerales portadores de azufre, para reducir la concentración de sulfuros,

### 2.2.2 Selección de reactivos

De acuerdo con estudios previos, la separación de minerales portadores de calcio y silicio puede realizarse eficazmente mediante flotación utilizando ácidos grasos como colectores (Liu & Liu, 2004; Dhar et al., 2020). Basándose en esta información, se realizaron pruebas preliminares en las que se evaluaron diversos reactivos con el objetivo de optimizar el proceso. Entre los colectores analizados se incluyeron ácido oleico, oleato de sodio y aceite a base de soya, mientras que como depresores se evaluaron silicato de sodio y otros compuestos diseñados para minimizar la flotación de insolubles.

Los resultados de estas pruebas permitieron identificar el aceite a base de soya como el colector más eficiente debido a su capacidad para maximizar la recuperación de CaO y minimizar la contaminación por impurezas, además, por la capacidad espumante del colector se prescindió del uso de un espumante específico.

Asimismo, se determinó que el silicato de sodio es el depresor más efectivo.

El circuito de flotación desarrollado se detalla en la Figura 1.

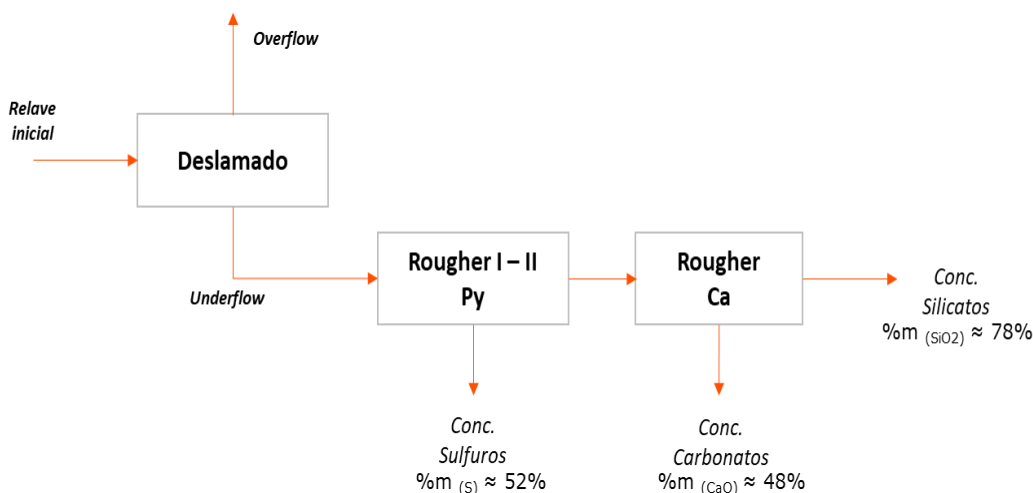


Figura 1. Circuito de flotación desarrollado por la PUCP de Rio.

### 2.3 Diseño experimental

Con base en los resultados preliminares, se diseñó un experimento factorial completo con el objetivo de evaluar las variables clave del proceso de flotación de carbonatos. En este diseño se consideraron tres factores principales: la concentración de colector (aceite de soya), la concentración de depresor (silicato de sodio) y el

1 Pérdida al fuego.

2 Factor de Saturación de Cal.

pH de la solución. Cada uno de estos factores fue evaluado en tres niveles diferentes: mínimo, central y máximo. La Tabla 3 presenta los niveles establecidos para cada uno de los factores estudiados.

**Tabla 3.** Niveles de diseño del planeamiento factorial

Factores	Nivel		
	Mínimo	Central	Máximo
Colector (g/t)	300	600	900
Depresor (g/t)	150	300	450
pH	8	9	10

## 2.4 Pruebas de calcinación y producción de clinker

El concentrado obtenido fue sometido a pruebas de calcinación a nivel laboratorio, donde se definieron parámetros críticos como el tiempo de residencia y la temperatura óptima para la formación de clinker (Zhang et al., 2013; Balykov et al., 2021; Huang & Cheng, 2020). Con los parámetros establecidos, el proceso fue escalado a nivel piloto, donde se produjo clinker en cantidad suficiente para evaluaciones posteriores. Este material fue finalmente sometido a molienda junto con la adición de yeso para obtener cemento, cumpliendo con las especificaciones requeridas para aplicaciones industriales.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Flotación de carbonatos

El diseño factorial implementado evaluó tres factores principales: la concentración del colector, la concentración del depresor y el pH de la solución. Los mejores resultados, en términos de recuperación metalúrgica (71,89%) y ley de CaO (47,10%), se obtuvieron bajo las siguientes condiciones óptimas: pH igual a 10, concentración de colector de 900 g/t y concentración de depresor de 300 g/t.

Aunque mayores concentraciones de depresor incrementaron la ley de carbonatos, esto afectó negativamente la recuperación metalúrgica. Por otro lado, el contenido promedio de azufre en los concentrados se mantuvo bajo (~1%) en todas las pruebas realizadas, cumpliendo con las especificaciones industriales.

Los resultados del planeamiento experimental se presentan en la Tabla 4, donde las pruebas 3, 6 y 12 muestran el mejor balance entre recuperación de carbonatos y ley de CaO.

**Tabla 4.** Resultados del planeamiento experimental – Concentrado de carbonatos

N° Prueba	Concentrado de carbonatos			
	Rec, (%)	Ley de CaO (%)	Ley de SiO <sub>2</sub> (%)	Ley de S (%)
1	52,27	46,00	8,85	0,87
2	67,19	43,80	12,30	1,00
3	71,89	42,30	14,20	1,05
4	50,42	47,00	8,05	0,91
5	63,61	44,30	10,90	0,93
6	69,86	42,10	13,80	0,98
7	40,22	46,80	8,08	0,90
8	60,31	42,90	13,10	1,06
9	64,36	41,90	13,90	1,09
10	53,87	46,20	9,12	1,00
11	64,83	44,00	11,70	1,10
12	71,23	41,70	14,00	1,18
13	45,72	47,70	7,19	1,00
14	63,44	45,10	10,60	1,01
15	68,44	43,20	12,90	1,10
16	41,20	47,10	8,31	1,06

N° Prueba	Concentrado de carbonatos			
	Rec, (%)	Ley de CaO (%)	Ley de SiO <sub>2</sub> (%)	Ley de S (%)
17	60,60	41,80	14,00	1,07
18	62,44	41,30	14,70	1,06

### 3.2 Análisis estadístico de la flotación de carbonatos

#### 3.2.1 Diagrama de Pareto

A partir de la información obtenida, se generaron diagramas de Pareto que muestran la significancia de las variables analizadas y sus efectos en la variable respuesta (Figuras 2, 3 y 4). Los resultados evidenciaron que la concentración del colector y el pH tienen una influencia significativa en la recuperación másica, el contenido de calcio y la recuperación metalúrgica. En contraste, la concentración del depresor no presentó una influencia estadísticamente significativa.

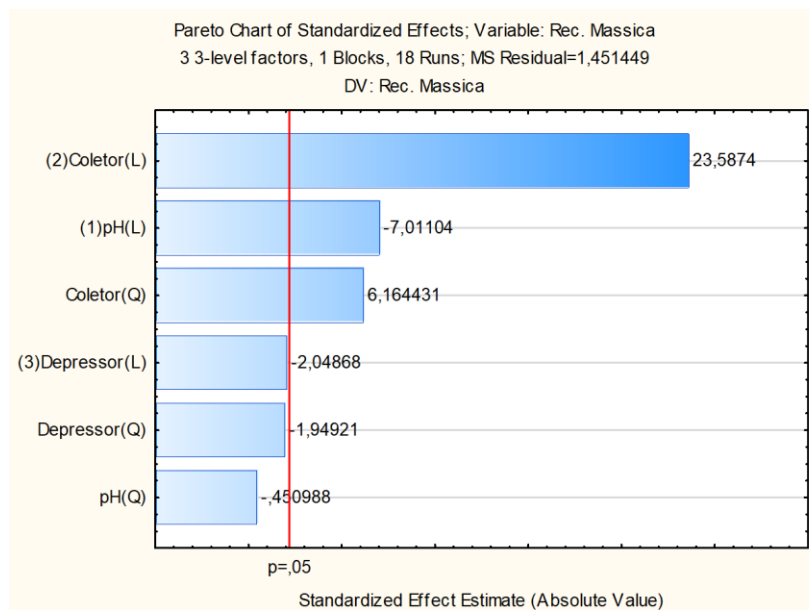


Figura 2. Efectos estandarizados de los factores en la recuperación másica durante la flotación de carbonatos.

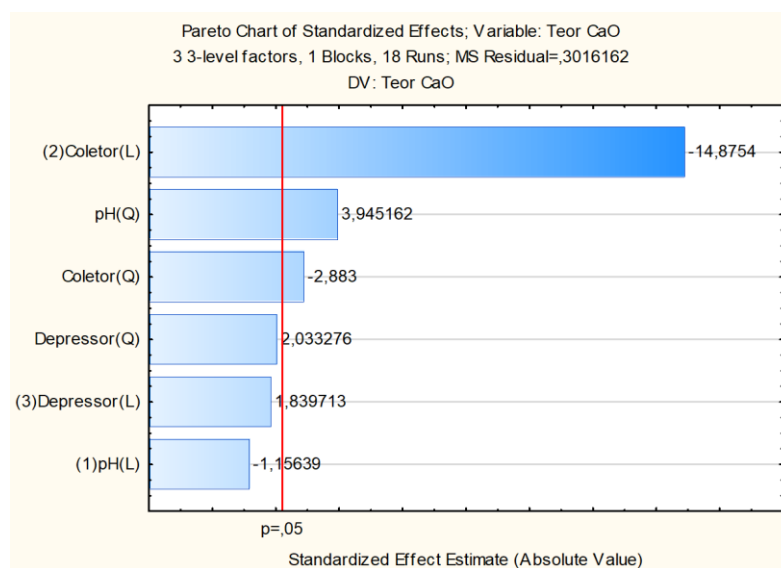
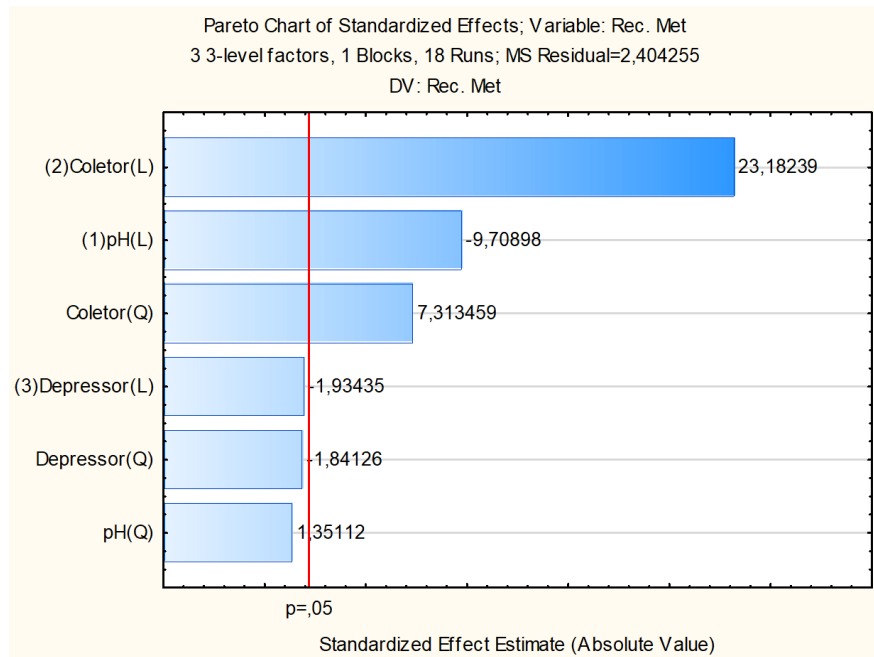


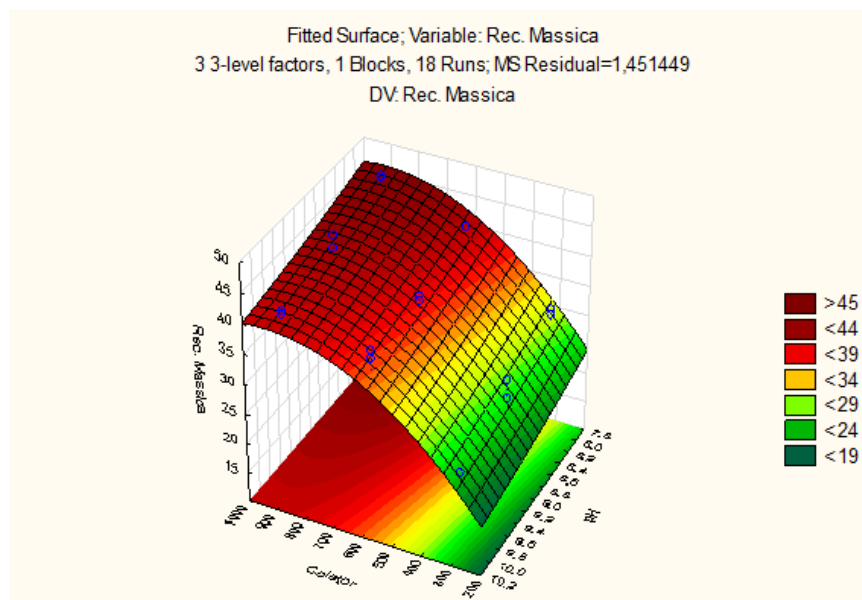
Figura 3. Efectos estandarizados de los factores en la ley de CaO durante la flotación de carbonatos.



**Figura 4.** Efectos estandarizados de los factores en la recuperación metálica durante la flotación de carbonatos.

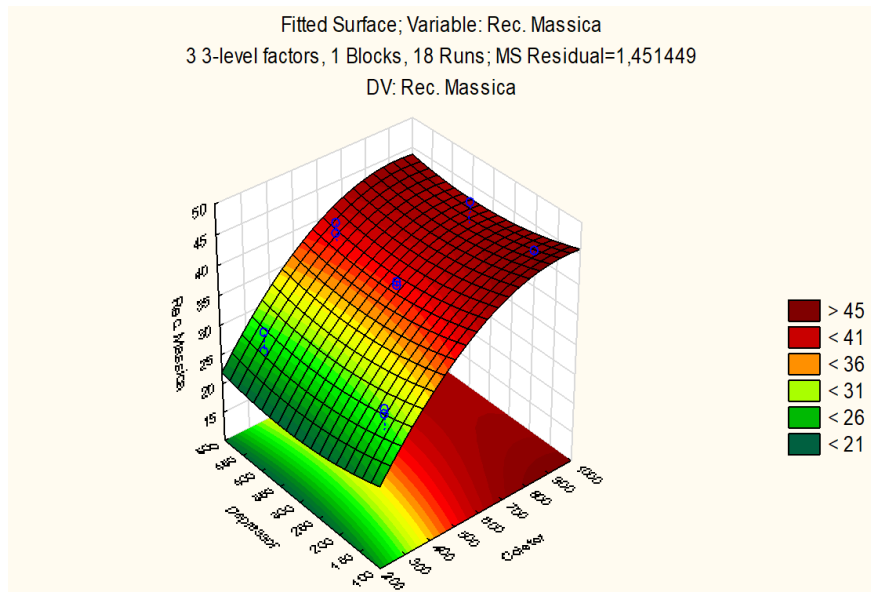
### 3.2.2 Gráficos de superficie de respuesta

La Figura 5 muestra el gráfico de superficie de respuesta para la recuperación másica. En este gráfico, se evalúan las variables independientes dosificación de colector y pH. Los resultados indican que, para alcanzar recuperaciones másicas superiores al 45%, el gráfico de superficie sugiere trabajar con dosificaciones alrededor de 900 g/t de colector y un pH de aproximadamente 8.



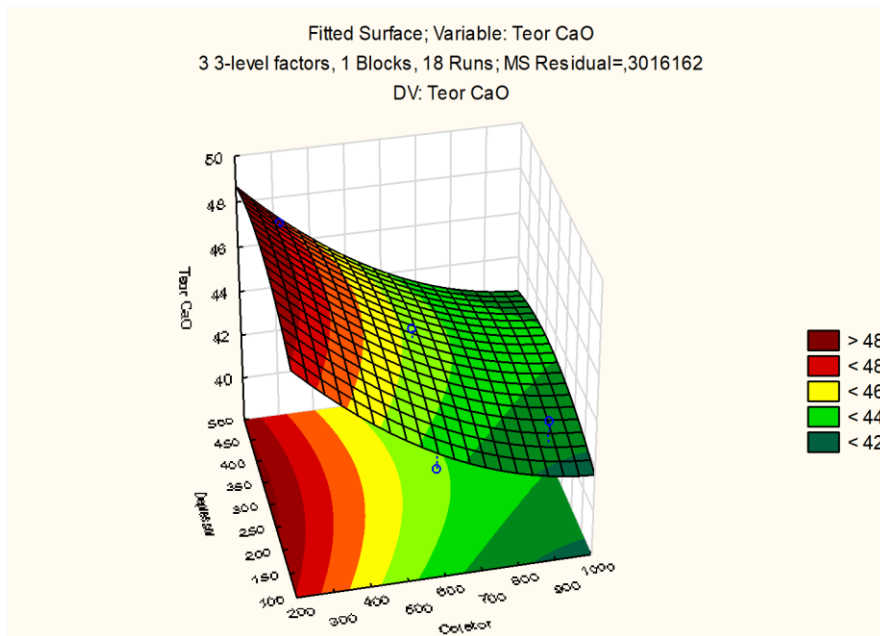
**Figura 5.** Superficie de respuesta para la recuperación másica, considerando las variables dosificación de colector y pH.

La figura 6 muestra la relación entre las variables independientes dosificación de colector y dosificación de depresor para la recuperación másica. Los resultados indican que las mejores condiciones para alcanzar una recuperación másica superior al 45% se encuentran en el rango de dosificación de colector entre 700 y 1000 g/t y de depresor entre 150 y 450 g/t.



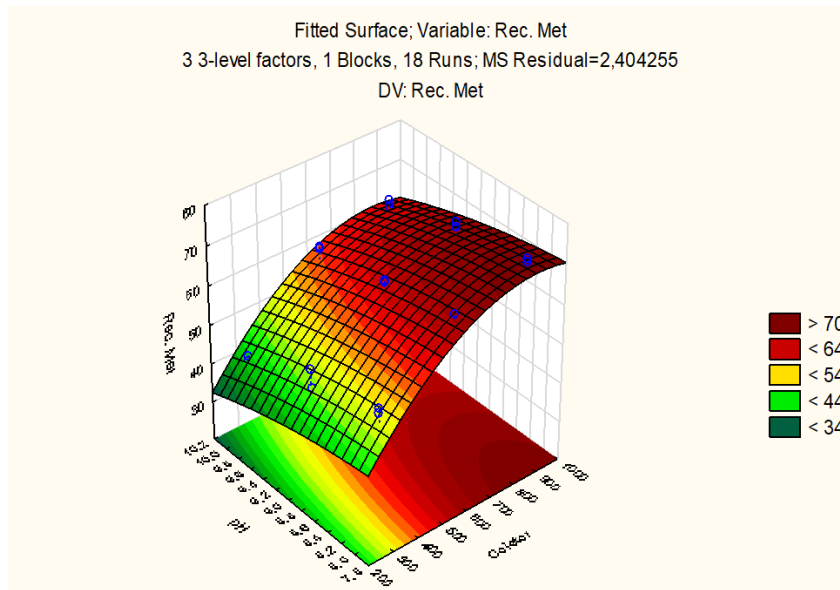
**Figura 6.** Superficie de respuesta para la recuperación másica, considerando las variables dosificación de colector y dosificación de depresor.

La Figura 7 muestra la superficie de respuesta para el contenido de CaO en el concentrado de flotación de carbonatos. En este gráfico se evalúan las variables independientes dosificación de colector y dosificación de depresor. Los resultados indican que las condiciones óptimas para alcanzar contenidos de CaO superiores al 48% corresponden a una dosificación de colector en torno a 200 g/t y de depresor en el rango de 150 a 450 g/t.



**Figura 7.** Superficie de respuesta para la ley de CaO, considerando las variables dosificación de colector y de depresor.

La Figura 8 presenta la superficie de respuesta que evalúa la relación entre la dosificación de colector y el pH de la solución sobre la recuperación metalúrgica de calcio. Según los resultados, las mejores condiciones para lograr una recuperación de calcio superior al 70% corresponden a una dosificación de colector en el rango de 700 a 1000 g/t y un pH entre 7,8 y 8,5.



**Figura 8.** Superficie de respuesta para la recuperación metalúrgica de calcio, considerando las variables dosificación de colector y el pH.

La Tabla 5 muestra los coeficientes y los valores de  $R^2$  correspondientes a los modelos de regresión lineal desarrollados para las variables de respuesta: recuperación másica, ley de CaO y recuperación metalúrgica. En todos los casos, se obtuvo un ajuste, con valores de  $R^2 > 0,95$ , lo que indica una excelente capacidad explicativa de los modelos.

**Tabla 5.** Coeficientes de los modelos de regresión lineal para la flotación de carbonatos

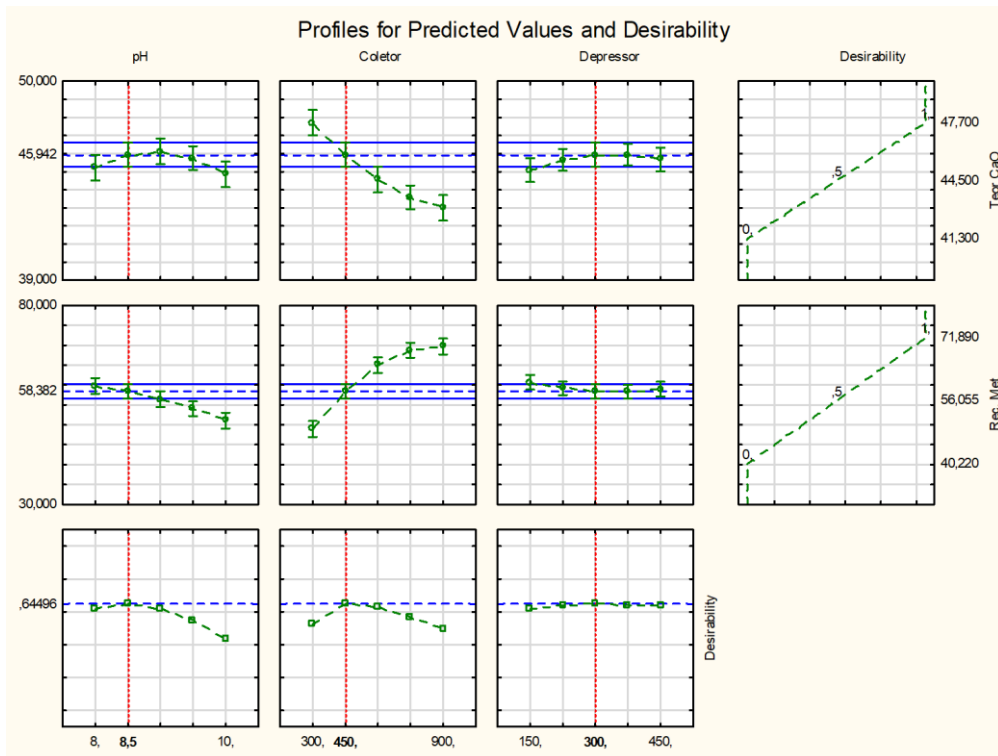
Factor	Variable Dependiente		
	Recu. másica	Ley CaO	Rec. Met.
Constante	57,168	-36,289	-18,650
pH (lineal)	-7,328	19,316	14,509
pH (cuadrático)	0,272	-1,083	-1,047
Colector (lineal)	0,077	-0,018	0,110
Colector (cuadrático)	-0,000	0,000	-0,000
Depresor (lineal)	-0,036	0,017	-0,044
Depresor (cuadrático)	0,000	-0,000	0,000
$R^2$	0,983	0,958	0,984

### 3.2.3 Análisis en herramienta "Desirability"

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la herramienta "Desirability", aplicada al proceso de flotación de carbonatos. Esta metodología permitió identificar las condiciones óptimas para maximizar simultáneamente la recuperación metalúrgica y el contenido de CaO. Las condiciones ideales determinadas fueron un pH de 8,5, una dosificación de colector de 450 g/t y una dosificación de depresor de 300 g/t.

La Figura 9 muestra un resumen de los perfiles de valores predichos y la función de "Desirability" compuesta, representando el grado de optimización alcanzado para las variables dependientes.





**Figura 9.** Perfiles de predicción y función de "Desirability" compuesta para la optimización de las variables dependientes en el proceso de flotación de carbonatos.

### 3.3. Pruebas de calcinación y producción de clinker

#### 3.3.1. Producción a nivel de laboratorio

Para garantizar la calidad del concentrado obtenido, se realizaron pruebas de calcinación a nivel de laboratorio con el apoyo de la Asociación Brasileña de Cementos (ABC). Estas pruebas incluyeron la evaluación del relave acondicionado para la producción de clinker, como se muestra en la Figura 10 (a).

Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos de calcinación en escala de laboratorio con el objetivo de definir los parámetros de temperatura, tiempo de residencia y producir material suficiente para evaluar las propiedades mecánicas del clinker obtenido. El producto resultante de esta etapa se puede observar en la Figura 10 (b).



**Figura 10.** Producción de Clinker a nivel de laboratorio. a) concentrado de carbonatos (crudo) y b) Calcinación del crudo.

Los resultados de las pruebas de resistencia mecánica del cemento producido con el clinker de laboratorio, evaluado a diferentes tiempos de curado (1, 3, 7, 14 y 28 días), se presentan en la Figura 11. El análisis indica que el cemento producido supera los estándares establecidos por la norma técnica peruana NTP-334,009 (INDECOPI, 2020) y ASTM C-150 (ASTM International, 2017) para cementos tipo I.

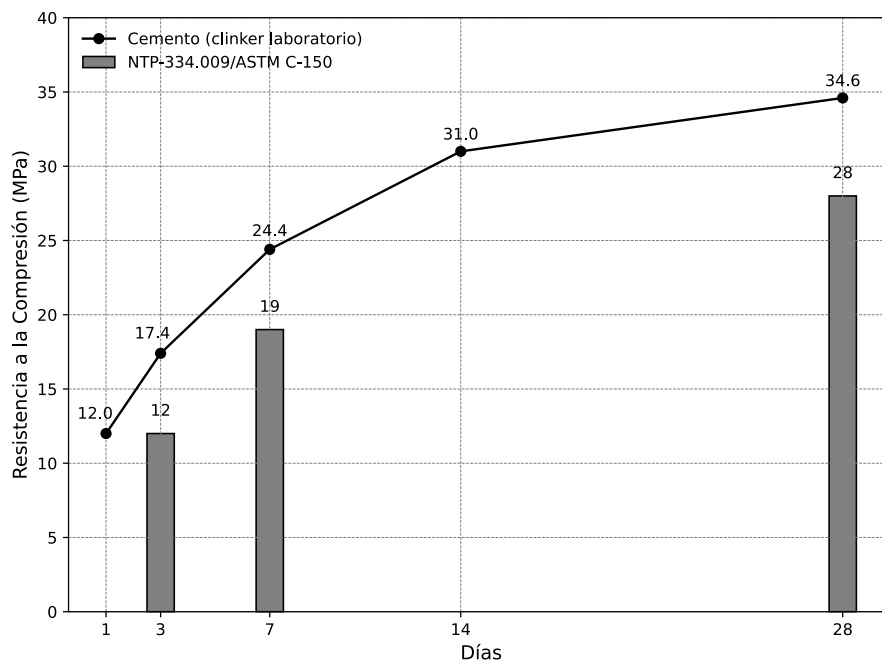


Figura 11. Ensayos de resistencia a la compresión del cemento producido a nivel laboratorio.

### 3.5 Pruebas piloto de flotación de carbonatos y producción de clinker

Tras la validación satisfactoria de la prueba de concepto, se llevaron a cabo pruebas piloto para la adecuación del relave, siguiendo el esquema de flotación previamente optimizado. Posteriormente, se procedió con la producción de clinker y cemento, Estas etapas permitieron adecuar 10 toneladas de relave, obteniendo 5 toneladas de cemento. En la Tabla 6 se muestra la composición promedio del concentrado de carbonatos.

Tabla 6. Caracterización del concentrado de carbonatos por FRX

Compuesto	%
CaO	42,37
SiO <sub>2</sub>	12,58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,18
MgO	2,86
K <sub>2</sub> O	0,58
PF	32
FSC	104

Durante la etapa de calcinación, se obtuvieron tres tipos de clinker a partir del concentrado de carbonatos, como se muestra en la Tabla 7. Solo el clinker tipo I cumplió con los requisitos de cal libre, PF y FSC.

Tabla 7. Tipos de Clinkers producidos en el pilotaje

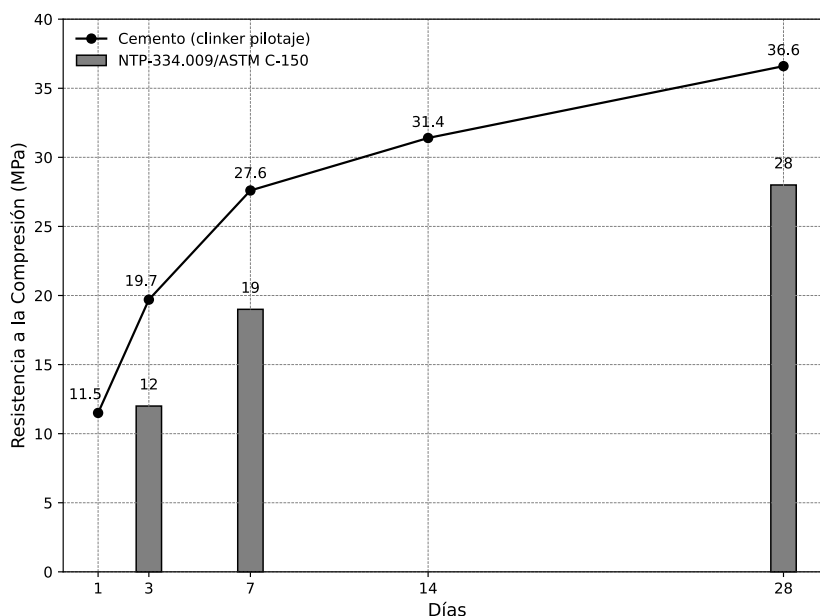
Clinker	Cal libre %	PF %	FSC
Tipo I	2,32	0,50	101,60
Tipo II	2,84	3,50	102,35
Tipo III	3,08	4,10	102,89

La Tabla 8 presenta la caracterización química del clinker tipo I, evaluada mediante FRX.

**Tabla 8.** Caracterización del clinker tipo I por FRX

Compuesto	%
CaO	62,01
SiO <sub>2</sub>	18,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,54
MgO	4,04
K <sub>2</sub> O	0,43
LOI	0,5
FSC	102

Finalmente, el clinker tipo I fue molido con un 5% de yeso para producir cemento. La Figura 12 muestra los resultados de resistencia a la compresión del cemento producido, evaluado a diferentes tiempos de curado.



**Figura 12.** Ensayos de resistencia a la compresión del cemento producido a nivel piloto.

### 3.6 Prueba industrial de aplicación del cemento

Con los resultados satisfactorios de las pruebas piloto, se llevó a cabo la prueba industrial utilizando el cemento producido a partir del clinker tipo I. Esta etapa incluyó evaluaciones en, shotcrete y relleno en pasta.

#### 3.6.1 Aplicación en shotcrete

Para las pruebas de shotcrete, se realizaron diversas evaluaciones de laboratorio para determinar el diseño óptimo de la mezcla. El diseño final, que se utilizó en la prueba industrial, se presenta en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Diseño de shotcrete para el cemento producido

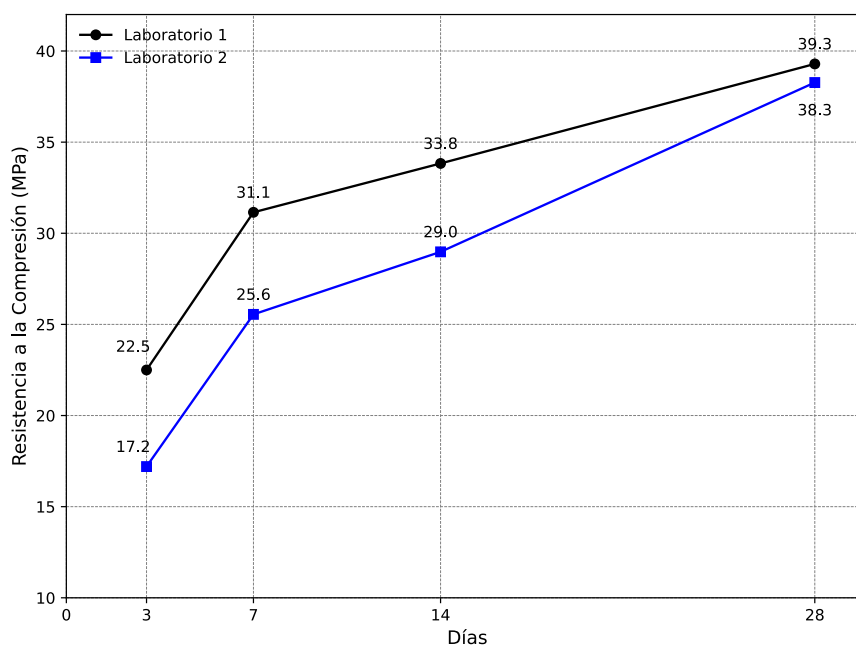
Insumos (seco)	Unidad	Valor
Cemento Nexa	Kg/m <sup>3</sup>	450
Agua de diseño	Lt/m <sup>3</sup>	180
Relación A/C	-	0,4
Arena de gradación	Kg/m <sup>3</sup>	1520
ViscoCrete 100SC	L/m <sup>3</sup>	5,27
Sigunit L-60 AF Plus	L/m <sup>3</sup>	28,72

Insumos (seco)	Unidad	Valor
Fibra Polystark	Kg/m3	5,0

Con el diseño de shotcrete establecido, se procedió con la prueba industrial, durante la cual se aplicaron 7 m<sup>3</sup> de shotcrete en la Unidad Minera El Porvenir.

La Figura 13 muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de las probetas diamantinas evaluadas en dos laboratorios independientes. Las diferencias observadas en las resistencias a edades iniciales son atribuibles a factores como diferencias en condiciones ambientales durante el curado, técnicas de muestreo y distintos técnicos de laboratorio. No obstante, al final de los 28 días, las resistencias alcanzaron valores prácticamente iguales en ambos laboratorios, lo que valida la consistencia y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

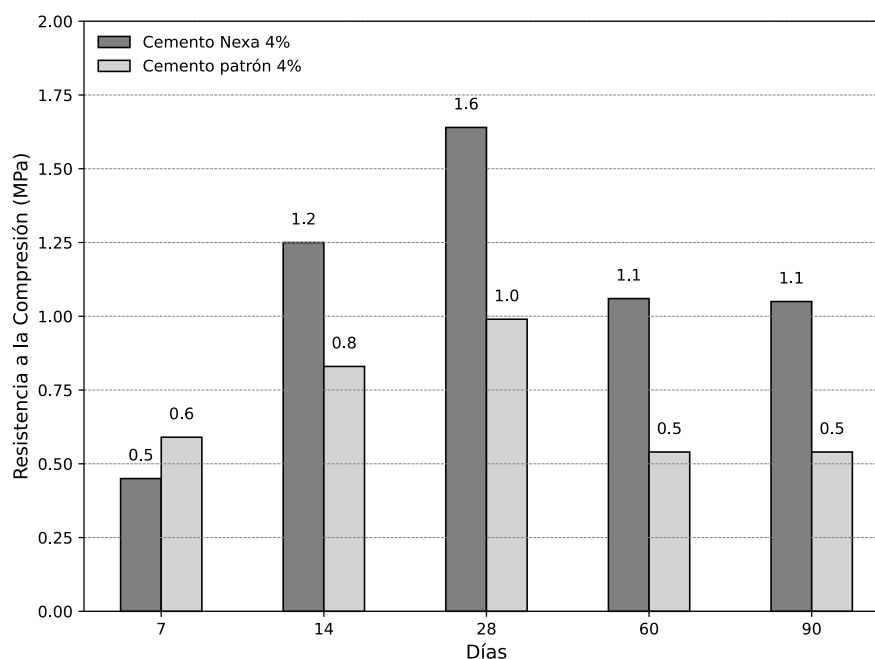
Estos resultados confirmaron los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio a la vez que superaron el objetivo requerido para la operación, alcanzando una resistencia promedio de 39 MPa a los 28 días de curado.



**Figura 13.** Ensayo de resistencia a la compresión, para las probetas diamantinas en dos laboratorios distintos.

### 3.6.2 Aplicación en relleno en pasta (backfill)

El cemento producido también fue evaluado en el diseño de relleno en pasta (backfill) de la Unidad Minera Cerro Lindo. Los resultados mostraron que el cemento elaborado a partir del relave presentó un desempeño significativamente superior al del cemento patrón en términos de resistencia a la compresión, figura 14.



**Figura 14:** Resistencia a la compresión del cemento producido en diseños de backfill, comparado con el patrón.

#### 4 CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó un esquema de flotación eficiente para la recuperación de carbonatos a partir de relaves mineros, optimizando la dosificación de colectores y depresores, y el pH de la solución. Este esquema permitió alcanzar una recuperación metalúrgica del 71,89% con una ley de CaO del 42,30%, garantizando un factor de saturación de cal cercano al valor requerido de 100.

Las pruebas de resistencia a la compresión realizadas en la aplicación de shotcrete con el cemento producido a partir del clínker tipo I demostraron resultados consistentes y reproducibles en dos laboratorios independientes. A los 28 días de curado, se alcanzó una resistencia promedio de 39 MPa, validando la calidad y el desempeño del cemento bajo condiciones industriales.

Las pruebas en aplicaciones de relleno en pasta (backfill) evidenciaron un desempeño significativamente superior del cemento producido en comparación con el cemento patrón. Este comportamiento se atribuye a la composición química optimizada del cemento Nexa, caracterizada por un menor contenido de minerales de aluminio, lo que mejora su resistencia en ambientes con altas concentraciones de sulfatos.

Con estos resultados, se valida técnicamente la producción de un cemento de alta calidad a partir del relave de la Unidad Minera El Porvenir, lo que constituye un avance significativo en la implementación de los principios de economía circular y sostenibilidad en la industria minera.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASTM International. (2017). *Standard specification for Portland cement (ASTM C-150)*. ASTM International. Disponible en <https://www.astm.org>
- Balykov, A. S., Nizina, T. A., Volodin, V., & Kyashkin, V. (2021). Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems. *Materials Science Forum*, 1017, 61–70. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.61>
- Bhatty, J. I., Miller, F. M., & Kosmatka, S. H. (Eds.). (2004). *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Portland Cement Association. ISBN: 978-0-89312-207-1.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). *La economía circular en la minería peruana*. Santiago: CEPAL. Disponible en <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47895>
- Deolalkar, S. P. (2016). *Designing Green Cement Plants*. ISBN: 978-0-12-802618-6.
- Dhar, P., Thornhill, M., & Kota, H. R. (2020). An overview of calcite recovery by flotation. *Materials Circular Economy*, 2(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00006-y>
- Gou, M., Zhou, L., & Ying Then, N. W. (2019). Utilization of tailings in cement and concrete: A review.

*Science and Engineering of Composite Materials*, 26(4), 449–460. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>

- He, Z. X., Xiao, Q. C., Zhou, X. Y., & Li, X. (2015). Solidification of heavy metal and production of cement clinker by lead-zinc tailings. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(10), 3961–3968. (In Chinese).
- Huang, L., & Cheng, [Falta Inicial]. (2020). Effects of calcination conditions on the formation and hydration performance of high-alite white Portland cement clinker. *Materials*, 13(3), 494. <https://doi.org/10.3390/ma13030494>
- INDECOPI. (2020). *Norma Técnica Peruana NTP-334.009: Cementos Portland*. Lima: Comisión de Normalización y Fiscalización de Barreras Comerciales. Disponible en <https://www.indecopi.gob.pe>
- Kretschmann, J., & Krause, F. (2023). Circular economy in mining tailings. *Minerals and Sustainable Practices*, 569–578.
- Liu, Y., & Liu, Q. (2004). Flotation separation of carbonate from sulfide minerals: I. Flotation of single minerals and mineral mixtures. *Minerals Engineering*, 17(8–9), 855–863. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.03.006>
- Luo, L., Zhang, Y. M., Bao, S. X., & Chen, T. J. (2016). Utilization of iron ore tailings as raw material for Portland cement clinker production. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, Article ID 4176256. <https://doi.org/10.1155/2016/4176256>
- Nastac, D. C., & Fechet, R. M. (2017). The influence of mine tailings and oily sludge on the Portland cement clinker manufacture. *Revista Romana de Materiale - Romanian Journal of Materials*, 47(2), 176–182.
- Wang, Y. X., Zhang, T. A., Zhang, Y. H., Lyu, G. Z., & Zhang, W. G. (2019). Mineral transformation in treating low-grade bauxite using the calcification–carbonization process and preparing cement clinker with the obtained residue. *Minerals Engineering*, 138, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.05.019>
- Zhang, J. J., Qi, Y. Y., & Wen, X. (2013). Influence of calcination temperature on formation of Portland cement clinker minerals. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 32, 1756–1762.
- Zhou, Z. L., Shi, Z. Z., Luo, Z. Y., Jiao, Y. Z., Lin, X. G., Cheng, L. M., Wang, S. R., & Yuan, X. Q. (2007). Experimental study on utilization of metallic tailings as clay for cement clinker calcinations. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 41(11), 1866–1869. (In Chinese).