

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Mejoramiento del consumo de cemento en planta de relleno en
una operación minera subterránea, basado en la reducción de
procesos operativos**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Antonio Agustín Ramos Manero

 [0009-0004-9955-2733](https://orcid.org/0009-0004-9955-2733)

Asesor

M.Sc. Carlos Alberto Rojas Leon

 [0009-0004-0770-4104](https://orcid.org/0009-0004-0770-4104)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Ramos Manero [1]
Referencia/Reference	[1] A. Ramos Manero, <i>“Mejoramiento del consumo de cemento en planta de relleno en una operación minera subterránea, basado en la reducción de procesos operativos”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Ramos, 2025)
Referencia/Reference	Ramos, A. (2025). <i>Mejoramiento del consumo de cemento en planta de relleno en una operación minera subterránea, basado en la reducción de procesos operativos</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

La presente va dedicada a Dios quien me brinda salud, así mismo a mis padres Antonio y Carmen que siempre han estado en los momentos buenos y más aún en los tiempos difíciles. Finalmente, a mi abuelita Lucila que siempre me guía desde donde se encuentre.

Agradecimientos

Agradecer a los profesionales de la Empresa NEXA RESOURCES quienes con su aporte fundamental han podido formar mi carrera profesional. Adicionalmente, a los docentes de la Universidad Nacional de Ingeniería quienes han podido guiar mis consultas a lo largo del desarrollo de mis estudios universitarios.

Resumen

En el presente estudio se analiza la optimización del consumo de cemento en la planta de relleno en pasta de una operación minera subterránea, a través de la reducción de procesos operativos. El principal objetivo es mejorar la eficiencia del uso de cemento mediante el cambio del tipo de cemento, reemplazando Unacem por Inka, con el fin de optimizar la bombeabilidad del relleno, evitar obstrucciones y reducir el desgaste prematuro de las tuberías debido a la sedimentación.

Los resultados obtenidos demuestran beneficios tanto operativos como económicos. Se logró una reducción del 10% en el consumo de cemento, mejorando la cobertura de stocks de seguridad y optimizando la planificación y asignación de recursos de transporte. Asimismo, se obtuvo una reducción en el costo del cemento puesto en la operación minera de Cerro Lindo, además de fortalecer la relación con el proveedor, consiguiendo un aumento del plazo de pagos en más de 30 días.

Desde el punto de vista logístico y ambiental, la reducción en el número de viajes de bombonas hacia la mina (360 unidades anuales menos) permitió disminuir las emisiones de CO₂ en aproximadamente 1,200 toneladas por año. Paralelamente, la optimización del proceso de relleno en pasta garantizó el nivel de resistencia requerido en menos de 30 días, asegurando la estabilidad estructural del relleno.

El impacto económico de esta mejora se tradujo en un ahorro estimado de 1.1 millones de dólares anuales, reforzando la receptividad de la unidad minera ante nuevas iniciativas de innovación en sus procesos operativos. Con base en estos resultados, se recomienda continuar con la implementación de estrategias que permitan la mejora continua en la eficiencia del uso de cemento y la sostenibilidad del proceso de relleno en minería subterránea.

Palabras clave — Cemento, relleno en pasta, bombeabilidad, eficiencia operativa, innovación, sostenibilidad.

Abstract

This study analyzes the optimization of cement consumption in the paste backfill plant of an underground mining operation through the reduction of operational processes. The main objective is to improve the efficiency of cement use by changing the type of cement, replacing Unacem with Inka, in order to optimize the pumpability of the backfill, prevent blockages, and reduce premature wear of pipelines due to sedimentation.

The results obtained demonstrate both operational and economic benefits. A 10% reduction in cement consumption was achieved, improving the coverage of safety stock and optimizing the planning and allocation of transportation resources. Additionally, a reduction in the cost of cement delivered to the Cerro Lindo mining operation was obtained, along with strengthened supplier relationships, achieving an extension of payment terms by more than 30 days.

From a logistical and environmental perspective, the reduction in the number of bombona transport trips to the mine (360 fewer units per year) led to a decrease in CO₂ emissions by approximately 1,200 tons per year. At the same time, the optimization of the paste backfill process ensured the required strength level in less than 30 days, guaranteeing the structural stability of the backfill.

The economic impact of this improvement resulted in an estimated annual savings of \$1.1 million, reinforcing the mining unit's receptiveness to new innovation initiatives in its operational processes. Based on these results, it is recommended to continue implementing strategies that allow for continuous improvement in cement use efficiency and the sustainability of the backfill process in underground mining.

Keywords — Cement, paste backfill, pumpability, operational efficiency, innovation, sustainability.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivo	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general.....	3
1.4.2 Hipótesis específicas	3
1.5 Operacionalización de variables	3
1.5.1 Variable independiente (V.I)	3
1.5.2 Variable dependiente (V.D)	3
1.6 Antecedentes referenciales	5
1.6.1 Antecedentes internacionales.....	5
1.6.2 Antecedentes nacionales	5
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Marco teórico.....	8
2.1.1 Relleno en pasta	8
2.1.2 Planta de relleno en pasta	10
2.1.3 Pasta.....	18
2.1.4 Propiedades físicas del relleno	21

2.2	Marco conceptual	22
	Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	24
3.1	Unidad de estudio	24
3.1.1	Mineralización	25
3.1.2	Zoneamiento	27
3.1.3	Litologías en sulfuros masivos.....	30
3.1.4	Mineralogía	31
3.1.5	Alteración	33
3.2	Caracterización mineralógica del relave	37
3.2.1	% Fe en el relave	40
3.2.2	Análisis de reservas minerales.	41
3.3	Inicio de pruebas con cemento del mercado (INKA)	44
3.3.1	Diseño de relleno en pasta.....	44
3.3.2	Análisis histórico de resistencias	46
3.3.3	Desarrollo de pruebas industriales	48
3.4	Auditoria del sistema de relleno.....	53
3.4.1	Problemas de cavitación en la bomba de pasta.....	53
3.4.2	Control de calidad de la pasta	54
3.4.3	Distribución de pasta	56
3.4.4	Consideraciones futuras.....	57
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	59
4.1	Análisis de resultados.....	59
4.2	Evaluación económica.....	62
	Conclusiones	66
	Recomendaciones	67
	Referencias bibliográficas	68
	Anexos	70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	4
Tabla 2 : Resultados del análisis químico del relave	37
Tabla 3 : Resultados de difracción de rayos X del relave	38
Tabla 4 : Resultados de fluorescencia de rayos X del relave	38
Tabla 5 : Resultados de análisis granulométrico del relave.....	39
Tabla 6 : Proyección del %Fe y %FeS ₂ del relave.....	42
Tabla 7 : Resultado de análisis químico de muestras del clarificador.....	43
Tabla 8 : Resultado de análisis ICP de muestras del clarificador	44
Tabla 9 : Parámetros técnicos del relleno	44
Tabla 10: Diseño del relleno en pasta.....	45
Tabla 11: Histórico de resistencias – muestreo en superficie.....	46
Tabla 12: Resumen de pruebas industriales	53
Tabla 13: Análisis químico de relave – pruebas industriales 9 y 10.....	60
Tabla 14: Condiciones comerciales	64
Tabla 15: Evaluación económica	64

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Vista general de la Unidad Minera Cerro Lindo	1
Figura 2 : Diagrama de Flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2	11
Figura 3 : Filtro de banda.....	13
Figura 4 : Tanque espesador	14
Figura 5 : Tolva mezcladora.....	15
Figura 6 : Bomba Putzmeister.....	17
Figura 7 : Prueba de Slump de la pasta.....	19
Figura 8 : Planta de Pasta Cerro Lindo No. 1 - No. 2 en el Fondo.....	24
Figura 9 : Zinc-baritina bandeados.....	26
Figura 10: Corredores con dirección NW-SE donde se encuentran emplazados los cuerpos (OB)	26
Figura 11: Muestras de sulfuros masivos, A) SPB ricos en Zn-Pb-Ag, B) SPB ricos en Cu.....	27
Figura 12: Ore Bodies (OB 2, 5, y 6).....	29
Figura 13: Ore Bodies (OB 2B, 6B, 6A; OB7)	29
Figura 14: Litologías en los sulfuros masivos de Cerro Lindo	31
Figura 15: Alteración hidrotermal en Cerro Lindo	35
Figura 16: Plano de alteraciones	36
Figura 17: Vista panorámica donde se observa los tres tipos de alteraciones	37
Figura 18: Distribución granulométrica del relave	39
Figura 19: Histórico %Fe en cabeza y relave	40
Figura 20: Reservas minerales para 2023 (enero a diciembre)	41
Figura 21: Reservas minerales desde 2024 – 2031	42
Figura 22: Proyección del %Fe y %FeS ₂ del relave	43
Figura 23: Muestras del clarificador analizadas	43
Figura 24: Curva de desarrollo de resistencia de la pasta.....	45

Figura 25: Histórico de resistencias por planta – 3% de cemento	47
Figura 26: Histórico de resistencias por planta – 4% de cemento	47
Figura 27: Histórico de resistencias por planta – 5% de cemento	47
Figura 28: Histórico de resistencias por planta – 7% de cemento	48
Figura 29: 1° Prueba Industrial - Cementos Inka 4.0, 3.5 y 3.0%	48
Figura 30: 2° Prueba Industrial Cementos Inka 4.5%.....	49
Figura 31: 3° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	49
Figura 32: 4° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	49
Figura 33: 5° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	50
Figura 34: 6° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	50
Figura 35: 7° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	50
Figura 36: 8° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%.....	51
Figura 37: 9° Prueba Industrial Cementos Inka 4.5%.....	51
Figura 38: 9° Prueba Industrial Cementos Inka 2.6% - planta 2	51
Figura 39: 10° Prueba Industrial Cementos Inka 3.0% - planta 2	52
Figura 40: Bombas gemelas Putzmeister HSP	54
Figura 41: Muestreo Subterráneo en Moldes de Acero	55
Figura 42: Curado de muestras desmoldadas en el laboratorio subterráneo de pasta	55
Figura 43: Máquina de ensayo de compresión ELE	56
Figura 44: Ruta de tuberías de pasta hacia OB9 este y festejo.....	58
Figura 45: Comparación se resultados histórico 5.0% vs cemento Inka 4.5%.....	59
Figura 46: Comparación se resultados histórico 4.0% vs cemento Inka 3.5%.....	59
Figura 47: Comparación se resultados histórico 3.0% vs cemento Inka 2.7%.....	60
Figura 48: Análisis químico del relave vs resistencia a 14 días	61
Figura 49: Ubicación de planta de nuevo proveedor	62
Figura 50: Análisis económico de la propuesta	63
Figura 51: Ahorro (MM USD) por consumo (%) y tipo de cemento.....	63

Glosario de términos

- ICP : Inductively Coupled Plasma (Plasma Acoplado Inductivamente)
- OB : Ore Bodie
- SPB : Sulfuros de barita primaria
- SPP : Sulfuros de pirita primaria
- SSM : Sulfuros semi masivos
- SBZ : Sulfuros baríticos zincíferos bandeados
- SBC : Sulfuros baríticos cupríferos
- SP : Sulfuros piritosos

Introducción

En la minería subterránea, el relleno en pasta es una técnica fundamental para la estabilidad de las excavaciones y el aprovechamiento de los residuos mineros. Sin embargo, su implementación eficiente depende de varios factores, entre ellos, el tipo de cemento utilizado, la optimización del proceso de mezcla y transporte, y la reducción de pérdidas operativas. En este contexto, el presente estudio aborda la optimización del consumo de cemento en la planta de relleno en una operación minera subterránea.

Para lograr estos objetivos, la tesis se estructura en cuatro capítulos. En el Capítulo I, se plantea la formulación del problema, los objetivos de la investigación, la hipótesis de trabajo, las variables clave y una revisión de antecedentes bibliográficos relevantes. El Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, abordando temas como el relleno en pasta, las características de la planta de relleno y las propiedades físicas del material utilizado.

El Capítulo III se enfoca en la unidad de estudio, describiendo la mineralización y mineralogía de la mina, la caracterización del relave, y los análisis de reservas minerales. Además, se presentan los resultados de las pruebas industriales realizadas con cemento Inka y una auditoría del sistema de relleno para evaluar su desempeño.

Finalmente, en el Capítulo IV, se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos, así como una evaluación económica de la propuesta, cuantificando los beneficios en términos de reducción de costos, optimización del uso del cemento y mejora en la eficiencia operativa. La tesis concluye con un conjunto de conclusiones y recomendaciones, resaltando las mejores prácticas identificadas y proponiendo estrategias para una implementación sostenible de las mejoras planteadas.

Este estudio no solo busca generar un impacto positivo en los costos operativos de la unidad minera, sino también contribuir a la innovación en los procesos de relleno en minería subterránea, optimizando el uso de recursos y promoviendo prácticas más eficientes y sostenibles.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

A medida que se realiza la profundización de la mina subterránea y la expansión de manera longitudinal, ha conllevado que la geología de los yacimientos mineralizados este cambiando, por lo que el contenido de pirita está disminuyendo y el de sílice está aumentando. Teniendo en cuenta que al inicio de las operaciones mineras la mineralogía del yacimiento comenzó con una combinación de pirita y pirrotita.

Las zonas mineras se están alejando cada vez más de las plantas de pasta. El sistema actual de distribución de pasta ya está funcionando al límite debido a las presiones de descarga limitadas en las bombas de Putzmeister. Ver figura 1.

Figura 1

Vista general de la Unidad Minera Cerro Lindo



Fuente: NEXA Resources

El sistema actual tiene un alcance de aproximadamente 1,5 km. Por ello, NEXA ha realizado una investigación que revisara el uso de bombas de refuerzo para ampliar el alcance del sistema de pasta.

Se debe tener en cuenta que la pasta actual se diluye para reducir las pérdidas por fricción durante el suministro a rebajes distantes, lo que agrava los problemas de sedimentación de sólidos en las tuberías de reticulación.

Las plantas de pasta actuales no son lo suficientemente grandes para la capacidad expandida de la mina. Con 21.000 toneladas por día, la mina crea alrededor de 4.800 m³ de espacio vacío diariamente, lo que, con una capacidad de 200 m³ /h, requeriría que ambas plantas de pasta operaran al 100% de manera continua.

Idealmente, para satisfacer esta demanda, la mina necesita una tercera planta de pasta de la misma capacidad, o debe depender de la disposición conjunta de roca estéril a una tasa nominal de 80 m³ /h. La mina ha acumulado un inventario de alrededor de 500.000 m³ en huecos de tajos sin capacidad para llenarlos con pasta.

Se espera que este problema empeore a medida que el contenido de pirita baje y, por lo tanto, la densidad de la pasta baje. Anticipando que los filtros de banda pronto se convertirán en un cuello de botella para la producción de pasta.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo influye el planeamiento de relleno en tajos lejanos que requiere mejorar el bombeo de la pasta producto de la planta de relleno en una operación minera subterránea?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo afecta en la planificación de la producción el bombeo del cemento en los espacios vacíos en la operación minera subterránea?
- ¿Cómo afecta en la planificación de la producción el tiempo de relleno de los espacios vacíos en la operación minera subterránea?

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Mejoramiento de la mezcla del cemento para la reducción de procesos operativos asociados y la reducción del consumo de agua en la planta de relleno de la operación minera subterránea.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Reducción de las tensiones de fluencia y las pérdidas por fricción en la red de reticulación, producto de la mezcla del cemento.
- Reducción del tiempo de fraguado de la pasta por disminución de consumo de agua

1.4 Hipótesis

1.4.1 *Hipótesis general*

La variación de la composición de la mezcla del cemento en la planta de relleno de la operación minera subterránea, mediante la aplicación de aditivos mejorará la densidad de la pasta aumentando la bombeabilidad de esta misma.

1.4.2 *Hipótesis específicas*

- La variación de la mezcla del cemento mejorará el bombeo de la pasta de la planta de relleno, hacia los espacios vacíos de los tajos de la operación minera subterránea.
- La variación de la mezcla del cemento reducirá el tiempo de fragua de la pasta, aumentando la cantidad de cemento y disminuyendo la cantidad de agua.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 *Variable independiente (V.I)*

X1: Parámetros de diseño de mezcla.

- Densidad de relave.
- Porcentaje de sólidos.

1.5.2 *Variable dependiente (V.D)*

Y1: Bombeo de pasta.

- Densidad de pasta.
- Consumo de cemento.
- Granulometría de relave.

Y2: Tiempo de fragua.

- Slump.
- Curva de desarrollo de resistencia.

Tabla 1

Matriz de consistencia

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
Problema General ¿Cómo influye el planeamiento de relleno en tajos lejanos que requiere mejorar el bombeo de la pasta producto de la planta de relleno en una operación minera subterránea?	Objetivo General Mejoramiento de la mezcla del cemento para la reducción de procesos operativos asociados y la reducción del consumo de agua en la planta de relleno de la operación minera subterránea.	Hipótesis General La variación de la composición de la mezcla del cemento en la planta de relleno de la operación minera subterránea, mediante la aplicación de aditivos mejorará la densidad de la pasta aumentando la bombeabilidad de esta misma.	X1: Independiente / Causa Parámetros de Diseño de Mezcla.	Densidad de relave Porcentaje de solidos	Tipo: experimental Diseño: Cualitativo y Cuantitativo
Problema específico 1 ¿Cómo afecta en la planificación de la producción el bombeo del cemento en los espacios vacíos en la operación minera subterránea?	Objetivo específico 1 Reducción de las tensiones de fluencia y las perdidas por fricción en la red de reticulación, producto de la mezcla del cemento.	Hipótesis específico 1: La variación de la mezcla del cemento mejorará el bombeo de la pasta de la planta de relleno, hacia los espacios vacíos de los tajos de la operación minera subterránea.	Y1: Dependiente / Efecto Bombeo de la pasta	Densidad de pasta Consumo de cemento Granulometría de relave	Instrumentos: Pruebas industriales a diferentes porcentajes de cemento Técnicas: Análisis Observaciones de campo.
Problema específico 2: ¿Cómo afecta en la planificación de la producción el tiempo de relleno de los espacios vacíos en la operación minera subterránea?	Objetivo específico 2: Reducción del tiempo de fraguado de la pasta por la disminución del consumo de agua.	Hipótesis específico 2: La variación de la mezcla del cemento reducirá el tiempo de fragua de la pasta, aumentando la cantidad de cemento y disminuyendo la cantidad de agua.	Y2: Dependiente / Efecto Tiempo de Fragua	Slump Curva de desarrollo de resistencia	Instrumentos: Pruebas de diseño de mezcla Técnicas: Análisis Observaciones de campo.

Fuente: Elaboración propia

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Lain Huerta, Carlos (2015) en su tesis doctoral, “Estudio de las distribuciones tensionales y de las resistencias de los rellenos de pasta de la mina subterránea de aguas teñidas (Huelva)”;

en la investigación se sostiene que, para el uso de relleno en pasta, se debe tener en consideración los parámetros de diseño, dosificación de mezcla, características de bombeo y transporte de relleno a los diferentes tajos minados, considerado como un 20 % del costo de operación. El estudio realiza una descripción del diseño de relleno en pasta, considerando los diferentes trabajos previos como los diferentes muros (diques tapón) para generar la estabilidad de las áreas que han sido minadas en diferentes frentes operacionales.

Vives Ávila, Alonso (2015) en su tesis titulado, “Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado”; el objetivo fue realizar un análisis comparativo del uso de relleno cementado en el diseño de una mina subterránea, con la finalidad de tener dominios geomecánicos adecuados, para evitar efectos de subsidencia y mejorar la recuperación.

El estudio asume como parámetros iniciales reservas de 3.05 Mt, Cu@1.59 % y una vida operacional de 7 años, y con el caso del uso de relleno, las reservas son de 6.68 Mt, Cu@1.61 % con una vida operacional de 11 años. Así mismo, hubo un control ambiental al utilizar relaves que fueron destinados a rellenar los tajos minados con un 50.2 % de la planta de relleno, definiendo evaluaciones económicas con un VAN positivo.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Villegas Landa, Luis (2006) en su tesis titulado “Relleno en pasta utilizado en la mina Iscaycruz” Nos indica que, el método de minado es muy dinámico, para lo cual se debe de emplear un ciclo de minado muy corto; siendo el relleno la principal actividad en el ciclo de minado. La utilización del relleno en pasta en nuestro caso es un elemento clave para nuestra explotación, además utilizar el relave producido por la planta como elemento principal nos ayuda a no depender de algún insumo para otro tipo de relleno.

El Relleno en Pasta se basa en el empleo de relaves, cemento, agua, y un químico floculante (éste ayuda a separar el líquido de las partículas del relave y le da una consistencia pastosa). los cuales son dosificados y mezclados en una Planta y luego transportados por una línea de tuberías hacia los niveles de la mina.

Este tipo de relleno nos permite tener una buena recuperación del mineral, a un bajo costo por las cantidades de cemento que se emplean. Para mantener el tipo de relleno acorde con las necesidades del método de explotación utilizado se realiza un riguroso control de calidad.

Finalmente podemos decir que este tipo de relleno es único en nuestro país con resultados óptimos desde el punto de vista de seguridad, operatividad y costos.

Ampuero J. et al (2015) en su tesis de maestría titulada “Propuesta de aplicación del método de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento”; el optimizar recursos de las operaciones es una preocupación constante para el minero, y el uso del desecho de relave en las operaciones se ha hecho cada día más frecuente. En la presente Tesis se presenta un sistema de relleno cementado usando relave, basado en mediciones de campo y análisis del relleno en una mina subterránea del centro de Perú, donde se usa el método de minado de corte y relleno ascendente.

El hecho de brindar confiabilidad a la mina, por medio del sistema de relleno cementado, no solo ayuda en la estabilidad de las labores, en las operaciones siguientes, también el uso del relave ayuda a mejorar el aspecto paisajístico de la zona, mostrando a la comunidad la responsabilidad de la mina por el cuidado del medio ambiente. Esto constituye un aspecto muy importante, ya que la licencia social en la minería se ha vuelto cada día más conflictiva por temas medioambientales.

En esta tesis se propone innovar un nuevo tipo de relleno preparando tajos con puentes y pilares reemplazados con mortero de relave previamente, a fin de recuperar totalmente el mineral contenido en estos. De esta manera, se podrá garantizar la colocación total del relave, filtrando el agua, y controlar el drenaje obtenido para su recirculación del

circuito cerrado en la concentradora, después de la masiva extracción de todo el mineral fragmentado contenido de cada tajeo.

Las ventajas obtenidas con este nuevo sistema, para aceptación de los empresarios, es el bienestar del entorno social, la preservación del medio ambiente, la recuperación del 10% al 15% del mineral cubicado (evitando la dilución del mineral al tener paredes auto estables), y evitar que la mina colapse por explosión de las rocas encajonantes, con la consecuente pérdida de dinero en equipo atrapado, mineral “enterrado” y hasta de pérdida de vidas humanas.

Finalmente se describe la toma muestra de un caso aplicado en la Minera ICM Pachapaqui como resultado del nuevo diseño de mezcla propuesto de la mejora en la confiabilidad del sostenimiento en las labores mineras.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Relleno en pasta*

El relleno en pasta es una técnica utilizada en minería subterránea para el relleno de excavaciones, con el objetivo de mejorar la estabilidad estructural, reducir la subsidencia y optimizar la disposición de los residuos mineros. Este método consiste en la mezcla de relaves, cemento y agua en proporciones específicas para formar una pasta homogénea que se bombea hasta las zonas a rellenar (Hassani et al, 2007).

Uno de los principales beneficios del relleno en pasta es su capacidad para reducir el impacto ambiental asociado con la disposición de relaves en superficie. A diferencia de los relaves convencionales, que pueden generar drenaje ácido y contaminación de cuerpos de agua, el relleno en pasta permite una mejor consolidación y reduce la lixiviación de metales pesados (Li et al, 2013). Además, su uso contribuye a la recuperación de áreas minadas y mejora la seguridad en la operación al reducir la posibilidad de colapsos o subsidencias (Yilmaz et al, 2014).

2.1.1.1 Selección de material de relleno. La selección del material de relleno es un aspecto clave en la minería subterránea, ya que influye en la estabilidad de las excavaciones, la eficiencia operativa y la reducción de costos. El material de relleno debe cumplir con criterios técnicos y económicos que garanticen su desempeño adecuado en la mina (Belem et al, 2008).

Criterios de selección del material de relleno

Propiedades mecánicas:

- Resistencia a la compresión para soportar cargas geomecánicas.
- Baja permeabilidad para evitar filtraciones de agua en las galerías.

Disponibilidad y costo:

- Uso de materiales de desecho como relaves o estériles mineros para reducir costos.
- Evaluación de la viabilidad económica del transporte y procesamiento.

Compatibilidad química:

- Reacción con aglomerantes como cemento o cal.
- Evitar la generación de drenaje ácido o reacciones perjudiciales (Li et al, 2013).

Reología y bombeabilidad:

- Facilidad de transporte del material en estado fluido.
- Estabilidad de la mezcla durante el bombeo y fraguado.

2.1.1.2 Características de un buen relleno. Un buen material de relleno en minería subterránea debe cumplir con ciertos criterios técnicos, operativos y ambientales para garantizar la estabilidad de las excavaciones, la seguridad del personal y la optimización de costos. La selección del material adecuado depende del tipo de mina, las condiciones geotécnicas y los objetivos de la operación (Belem et al, 2008).

Resistencia mecánica adecuada

- Debe soportar la presión de la roca circundante y evitar el colapso de las excavaciones.
- La resistencia a la compresión debe ser suficiente para permitir la extracción segura de pilares y evitar inestabilidad.
- El uso de aglomerantes como cemento puede mejorar la resistencia del relleno (Li et al, 2013).

Baja permeabilidad

- Un buen relleno debe minimizar la filtración de agua para evitar la lixiviación de contaminantes.
- La reducción de la permeabilidad también mejora la cohesión y estabilidad del material.

Facilidad de bombeo y colocación

- En el caso de rellenos en pasta o hidráulicos, la mezcla debe tener una buena fluidez para facilitar su transporte a través de tuberías.
- La reología del material debe permitir un adecuado tiempo de fraguado sin generar segregación de partículas (Hassani et al., 2007).

Estabilidad química y ambiental

- No debe generar drenaje ácido ni lixiviación de metales pesados que puedan contaminar las aguas subterráneas.
- El uso de relaves estabilizados y materiales cementados puede ayudar a reducir impactos ambientales.

Uso de materiales disponibles y de bajo costo

- Se debe priorizar el uso de desechos mineros, como relaves o estériles, para reducir costos y minimizar la necesidad de almacenamiento superficial.
- Un buen relleno debe ser económicamente viable y sostenible en el tiempo.

Compatibilidad con la geometría de la mina

- Debe adaptarse a los requerimientos de cada operación minera, como relleno en cámaras y pilares, subniveles o métodos de corte y relleno.
- La compactación y el fraguado deben asegurar que el relleno se mantenga estable en la estructura de la mina.

2.1.2 Planta de relleno en pasta

Una planta de relleno en pasta es una instalación diseñada para la producción y transporte de relleno en pasta, utilizado en minería subterránea para estabilizar excavaciones y mejorar la gestión de relaves. Estas plantas combinan relaves deshidratados, cemento y agua en proporciones controladas para generar una mezcla con propiedades reológicas y mecánicas adecuadas, la cual se bombea hasta las áreas de trabajo dentro de la mina (Hassani et al., 2007).

Componentes de una Planta de Relleno en Pasta. Ver figura 2.

Sistema de recepción y almacenamiento de relaves:

- Los relaves provienen del proceso de beneficio del mineral y se almacenan en tanques o silos.
- Se requiere un control de humedad para lograr la consistencia deseada de la pasta (Li et al, 2013).

Planta de mezclado:

- Incluye mezcladores de alta eficiencia para homogeneizar los relaves con el aglomerante (cimento o cenizas volantes) y el agua.
- Se utilizan sensores para monitorear la viscosidad y densidad de la mezcla en tiempo real (Yilmaz et al, 2014).

Sistema de bombeo y transporte:

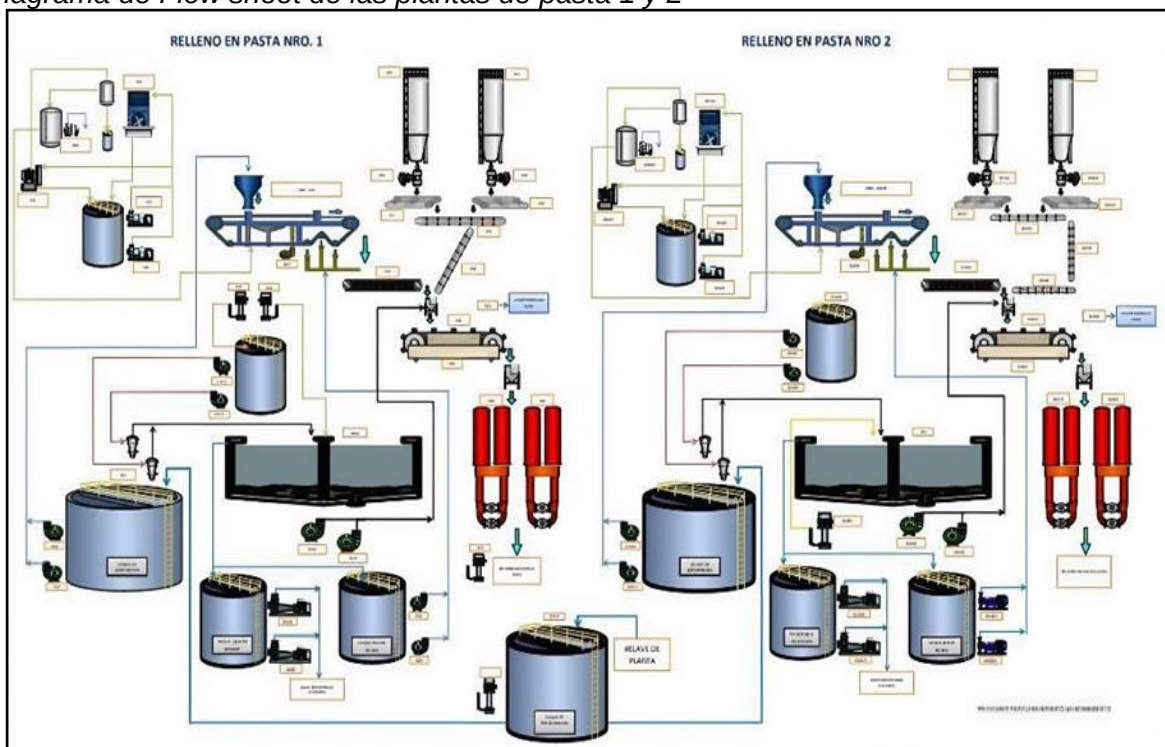
- La pasta se transporta mediante tuberías hacia las galerías subterráneas.
- Se emplean bombas de pistón o de desplazamiento positivo debido a la alta viscosidad del material.

Control y automatización:

- Sensores y sistemas SCADA permiten la regulación del proceso para optimizar el uso de materiales y reducir costos (Belem et al, 2008).

Figura 2

Diagrama de Flow sheet de las plantas de pasta 1 y 2



Fuente: NEXA Resources

La U.M. Cerro Lindo dispone de dos plantas de relleno en pasta, cada una operando de manera autónoma en la preparación del material, desde la recepción de los relaves

procedentes de la planta metalúrgica hasta su bombeo hacia los tajos que requieren ser rellenados.

2.1.2.1 Filtro de banda. El filtro de banda es un equipo utilizado en la deshidratación de lodos y relaves en procesos industriales, especialmente en minería y tratamiento de aguas residuales.

Su funcionamiento se basa en el uso de una banda filtrante continua que transporta el material a través de diferentes zonas de compresión y drenaje, eliminando el exceso de agua y generando un sólido con menor contenido de humedad (Sánchez et al, 2018). Ver figura 3.

Principio de funcionamiento.

El proceso de filtración en un filtro de banda se desarrolla en varias etapas:

Acondicionamiento del Material:

- Se agregan agentes floculantes al lodo o relave para mejorar la separación de sólidos y líquidos.

Filtración por Gravedad:

- El material se deposita sobre la banda filtrante y el agua libre drena a través de la tela, ayudada por la gravedad.

Zona de Compresión:

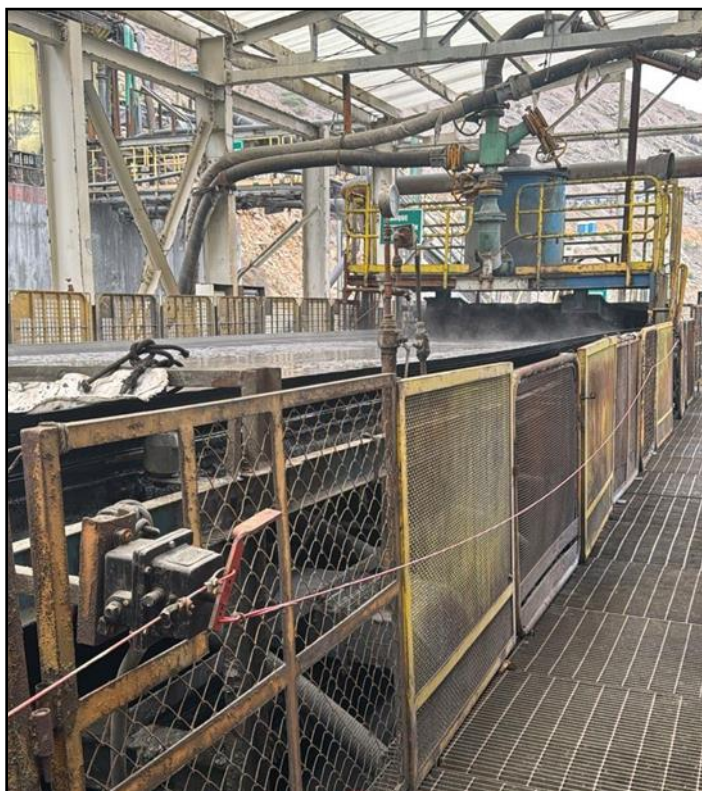
- Rodillos aplican presión progresiva para extraer el agua restante del material.

Descarga del Sólido Filtrado:

- Una vez alcanzado el nivel de humedad deseado, el sólido seco se desprende de la banda y es transportado para su disposición o reutilización (Gutiérrez et al, 2020).

Figura 3

Filtro de banda



Fuente: NEXA Resources

2.1.2.2 Tanque espesador. El tanque espesador es un equipo utilizado en procesos industriales para la separación de sólidos y líquidos mediante sedimentación por gravedad. Su función principal es aumentar la concentración de los sólidos en suspensión, reduciendo el volumen de agua en la fase líquida y facilitando la recuperación de agua para su reutilización en el proceso productivo (Takahashi et al, 2019). Ver figura 4.

Principio de funcionamiento.

El espesamiento ocurre dentro de un tanque cilíndrico de gran diámetro, donde la suspensión de sólidos es alimentada en el centro del equipo. A medida que el material ingresa, los sólidos más densos sedimentan hacia el fondo, formando un lodo concentrado, mientras que el agua clarificada se recoge en la parte superior (Zhang et al., 2021).

Las principales etapas del proceso de espesamiento incluyen:

Alimentación:

La pulpa de sólidos y líquidos ingresa al tanque, generalmente con ayuda de un sistema de dispersión para evitar turbulencias.

Sedimentación:

Los sólidos comienzan a decantar por gravedad, formando una capa de lodo en la parte inferior del tanque.

Recolección del agua clarificada:

En la parte superior del tanque, se extrae el agua con menor cantidad de sólidos para su recirculación o disposición.

Descarga del lodo espesado:

En el fondo del tanque, se extrae el lodo concentrado mediante bombas o sistemas de descarga controlada (Gutiérrez et al, 2020).

Figura 4: Tanque espesador

Tanque espesador



Fuente: NEXA Resources

2.1.2.3 Mezclador (Mixer). Un mezclador, también conocido como mixer, es un equipo utilizado en diversos procesos industriales para combinar de manera homogénea dos o más materiales, ya sean líquidos, sólidos o una mezcla de ambos. Su aplicación es fundamental en industrias como la minería, la construcción, la química y la alimentaria, donde se requiere garantizar una distribución uniforme de los componentes en el producto final (Smith et al, 2018). Ver figura 5.

Principio de funcionamiento.

El proceso de mezclado varía según el tipo de material y el diseño del equipo, pero generalmente incluye las siguientes etapas:

Carga de materiales:

Los componentes a mezclar se introducen en la cámara del mezclador.

Agitación y homogeneización:

Se utilizan paletas, hélices, aspas u otros mecanismos para distribuir los materiales de manera uniforme.

Descarga del producto mezclado:

Una vez obtenida la homogeneidad deseada, la mezcla se transfiere a la siguiente etapa del proceso (Jones et al., 2020).

Figura 5

Tolva mezcladora



Fuente: NEXA Resources

Tipos de mezcladores.

Existen diversos tipos de mezcladores, dependiendo de la naturaleza de los materiales y del tipo de proceso:

Mezcladores de paletas:

Utilizados en la industria minera y de la construcción para mezclar cemento, arena y agua.

Mezcladores de tornillo (Ribbon Blender):

Empleados en la industria química y alimentaria para productos en polvo.

Mezcladores de tambor rotatorio:

Comunes en la producción de concreto y en procesos de aglomeración.

Mezcladores de alta velocidad:

Utilizados en la industria farmacéutica y cosmética para garantizar una mezcla rápida y uniforme (Martínez et al, 2019).

2.1.2.4 Bomba Putzmeister. Las bombas Putzmeister son equipos de alta eficiencia diseñados para el bombeo de materiales de alta viscosidad, como concreto, mortero, relaves mineros y relleno en pasta. Estas bombas son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción y la minería debido a su capacidad para transportar materiales densos a largas distancias y alturas con gran precisión y fiabilidad (Putzmeister, 2021). Ver figura 6.

Principio de funcionamiento.

Las bombas Putzmeister operan mediante un sistema de pistones o rotor-estator que permite el desplazamiento continuo del material. Su diseño permite el bombeo de materiales con alta concentración de sólidos sin comprometer la eficiencia del proceso. El funcionamiento general se puede describir en las siguientes etapas:

Recepción del material:

El material a bombear es alimentado a la tolva de la bomba.

Desplazamiento del material:

A través del sistema de pistón o rotor, el material es impulsado dentro del sistema de tuberías.

Bombeo y transporte:

El material es trasladado a través de mangueras o tuberías hasta el destino final, con un control preciso de presión y caudal (Gutiérrez et al, 2020).

Tipos de Bombas Putzmeister.

Bombas de pistón hidráulico:

Ideales para bombeo de concreto y relleno en pasta en minería.

Bombas de tornillo (Rotor-Estator):

Usadas para transportar materiales con consistencia fluida, como morteros y lechadas.

Bombas de transporte de relaves:

Especialmente diseñadas para la industria minera, con capacidad para manejar materiales abrasivos y de alta densidad (Martínez et al, 2019).

Figura 6

Bomba Putzmeister



Fuente: NEXA Resources

2.1.3 Pasta

En minería subterránea, la pasta se refiere a una mezcla de relaves, agua y aglomerantes (como cemento o cenizas volantes), utilizada principalmente en el relleno de excavaciones. Este tipo de relleno mejora la estabilidad del macizo rocoso, permite una extracción segura de los minerales y contribuye a la gestión sostenible de los residuos mineros (Belem et al, 2008). Ver figura 7.

Composición de la pasta.

Una pasta de relleno bien diseñada debe cumplir con ciertos requisitos para garantizar su rendimiento óptimo en la mina. Su composición básica incluye:

Relaves o estériles finos:

- Proviene del proceso de beneficio de minerales y actúan como la fracción sólida de la pasta.
- Su granulometría influye en la fluidez y estabilidad de la mezcla.

Aglomerantes (Cemento, Cal o Cenizas Volantes):

- Aportan cohesión y resistencia mecánica al relleno.
- El porcentaje de aglomerante varía según las necesidades estructurales y económicas.

Agua:

- Proporciona la fluidez necesaria para su bombeo e instalación en la mina.
- Su proporción se ajusta para evitar segregación y garantizar una adecuada reología (Li & Zhang, 2013).

Propiedades claves de la pasta.

- Alta concentración de sólidos:
Se diferencia del relleno hidráulico porque tiene menor contenido de agua (generalmente >70% de sólidos).
- Baja permeabilidad:
Reduce la migración de contaminantes y evita el drenaje excesivo de agua.

- Alta resistencia mecánica:

Dependiendo del contenido de aglomerante, puede soportar cargas geomecánicas significativas.

- Facilidad de bombeo:

Su comportamiento reológico permite su transporte a través de tuberías sin riesgo de segregación.

Aplicaciones de la pasta en minería.

- Relleno de tajeos subterráneos:

Estabiliza las excavaciones y permite la recuperación de pilares.

- Manejo de relaves mineros:

Reduce la cantidad de residuos en superficie y mejora la sostenibilidad ambiental.

- Prevención de subsidencias:

Se usa para rellenar cavidades y evitar colapsos del terreno.

Figura 7

Prueba de Slump de la pasta



Fuente: NEXA Resources

2.1.3.1 Reología de la pasta. La reología de la pasta se refiere al estudio del comportamiento de flujo y deformación de la mezcla de relaves, agua y aglomerantes utilizados en el relleno en minería subterránea. Comprender la reología es clave para optimizar el bombeo, evitar segregaciones y garantizar una adecuada colocación del relleno en los tajos mineros (Fall et al., 2015).

Propiedades reológicas de la pasta.

Las propiedades reológicas de la pasta dependen de la concentración de sólidos, el tipo de aglomerante y las condiciones de mezcla. Los parámetros más importantes son:

- Viscosidad (η):

Resistencia interna de la pasta al flujo; una mayor viscosidad dificulta el bombeo.

- Límite de fluidez (τ_0):

Esfuerzo mínimo necesario para que la pasta comience a fluir.

- Comportamiento no newtoniano:

La pasta no sigue las leyes de Newton, ya que su viscosidad cambia con la velocidad de deformación.

En general, la pasta de relleno se comporta como un fluido plástico de Bingham, lo que significa que necesita un esfuerzo umbral para iniciar el flujo y luego se comporta de manera casi lineal (Wu et al., 2018).

Factores que afectan la reología de la pasta.

Concentración de sólidos:

- Un mayor contenido de sólidos (>70%) incrementa la viscosidad y el límite de fluidez.
- Un contenido demasiado bajo provoca segregación y problemas de sedimentación.

Tipo y cantidad de aglomerante:

- Cemento, cal y cenizas volantes modifican la viscosidad y el fraguado de la pasta.
- A mayor contenido de aglomerante, aumenta la cohesión y resistencia mecánica.

Granulometría de los relaves:

- Partículas más finas aumentan la viscosidad debido a una mayor área superficial.
- La distribución de tamaños de partícula influye en la estabilidad del flujo.

Tiempo de mezclado y bombeo:

- La reología cambia con el tiempo debido a procesos de hidratación del cemento.
- Un mal control del tiempo puede generar endurecimiento prematuro en las tuberías.

Temperatura y química del agua:

- La temperatura afecta la hidratación del cemento y la viscosidad del relleno.
- La presencia de sulfatos o cloruros puede alterar las propiedades reológicas.

2.1.4 Propiedades físicas del relleno

2.1.4.1 Densidad de la mezcla (ρ_m). La densidad de la mezcla es la masa por unidad de volumen del relleno en estado fresco y depende de la proporción de sólidos, agua y aglomerantes en la pasta. Se expresa en kg/m³ y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_m = \frac{m_s + m_l}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ_m = Densidad de la mezcla (kg/m³)

m_s = Masa de los sólidos (kg)

m_l = Masa del líquido (agua) (kg)

V = Volumen total de la mezcla (m³)

Importancia: Una mayor densidad indica una mezcla más concentrada, lo que mejora la resistencia del relleno, pero puede dificultar el bombeo.

2.1.4.2 Velocidad de percolación (V_p). La velocidad de percolación es la rapidez con la que el agua se filtra a través del relleno. Se expresa en m/s y se determina mediante la Ley de Darcy:

$$V_p = \frac{k \cdot \Delta h}{L} \quad (2)$$

Donde:

V_p = Velocidad de percolación (m/s)

k = Coeficiente de permeabilidad del relleno (m/s)

Δh = Diferencia de carga hidráulica (m)

L = Espesor de la capa de relleno (m)

Importancia: Una velocidad de percolación baja evita la segregación del agua en el relleno y mejora la cohesión de la mezcla.

2.1.4.3 Velocidad crítica de deposición (v_c). La velocidad crítica de deposición es la velocidad mínima a la que las partículas en suspensión comienzan a sedimentarse dentro de la mezcla. Se calcula con la ecuación de Richardson y Zaki (1954) para flujos de partículas en suspensión:

$$v_c = v_0(1 - \phi)^n \quad (3)$$

Donde:

v_c = Velocidad crítica de deposición (m/s)

v_0 = Velocidad de sedimentación de una partícula individual (m/s)

ϕ = Fracción volumétrica de sólidos en la mezcla

n = Exponente que depende del tipo de flujo y concentración de sólidos.

Importancia: Si la velocidad de transporte es menor que v_c , las partículas se depositarán y pueden causar obstrucciones en las tuberías de bombeo.

2.2 Marco conceptual

Cemento:

Material aglomerante en polvo que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece, proporcionando cohesión en el relleno minero.

Muestreo:

Proceso sistemático de recolección de muestras representativas de materiales (cemento, relaves, agua) para su análisis y control de calidad en la operación minera.

Mineralogía:

Ciencia que estudia la composición, estructura y propiedades de los minerales presentes en un material, como el relave o el mineral extraído.

Relave minero:

Residuo sólido resultante del procesamiento de minerales en plantas metalúrgicas, compuesto por partículas finas y agua, utilizado en relleno en pasta.

Relación agua/cemento (a/c):

Proporción entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento en una mezcla, determinante para la resistencia y trabajabilidad del relleno.

Resistencia a la compresión:

Capacidad del material de soportar cargas sin sufrir deformación o falla, medida en Megapascuales (MPa), clave en la calidad del relleno cementado.

Dosificación:

Proporción controlada de cada componente en una mezcla (cemento, agua, relave) para alcanzar las propiedades mecánicas y reológicas requeridas.

Fraguado:

Proceso de endurecimiento progresivo del cemento después de su hidratación, definiendo el tiempo en que la mezcla pierde su fluidez y gana resistencia inicial.

Permeabilidad:

Propiedad del material que determina la facilidad con la que los fluidos pueden atravesarlo, influyendo en la retención de agua y estabilidad del relleno.

Bombeo: Método de transporte del relleno en estado fluido mediante tuberías, esencial para su colocación eficiente en minería subterránea.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

Las operaciones de extracción de pasta en la mina Cerro Lindo de NEXA, ubicada en el distrito de Chavín, provincia de Chíncha, Perú. La mina se encuentra aproximadamente a 270 km al sureste de Lima y a 60 km de la costa, a una altitud de unos 2.500 m.

La mina Cerro Lindo produce concentrados de zinc a partir de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos.

La mina opera dos plantas de pasta idénticas ubicadas aproximadamente a 80 m de distancia, cada una con una capacidad de 100 m³/h. Las plantas de pasta fueron construidas en 2008 y utilizan filtros de banda para producir una torta filtrada con aproximadamente un 12% de humedad, que luego se mezcla en lotes hasta alcanzar un 80% de sólidos en un mezclador continuo ARCEN. Posteriormente, la pasta es transportada a la mina a través de dos conjuntos de bombas de pistón Putzmeister. Ver figura 8

Figura 8

Planta de Pasta Cerro Lindo No. 1 - No. 2 en el Fondo



Fuente: NEXA Resources

Cuando las plantas de pasta fueron puestas en operación en 2008, la planta metalúrgica utilizaba una molienda mucho más fina en los minerales de sulfuros masivos. Además, el mineral estaba compuesto aproximadamente por un 80% de pirita, junto con un

contenido adicional de barita y pirrotita. Esto resultó en un mineral con una gravedad específica muy alta (alrededor de 4.8 a 4.9 en 2008) y, por lo tanto, en una pasta con una gravedad específica igualmente elevada (aproximadamente entre 2.8 y 2.9).

3.1.1 Mineralización

La mineralización en Cerro Lindo es polimetálica, predominando el zinc con cobre, además de menores cantidades de plata y plomo. La ganga principal es pirita con baritina. Los cuerpos mineralizados son irregulares o lenticulares, compuestos por sulfuros masivos con pirita (50-95%), esfalerita, calcopirita y galena. La baritina está presente en un 10-60%, principalmente en las zonas superiores. Ver figura 9.

El yacimiento está controlado por fallas transversales de tendencia NNE con buzamientos de 60-80° ESE, dentro de las cuales se emplazaron diques pórfido andesíticos tardíos. Su extensión es de 1350 m de largo, 550 m de ancho y hasta 290 m de profundidad, con un rumbo NW y buzamiento de 65° SW. Se estima un total de más de 200 Mt de sulfuros masivos acumulados. Ver figura 10.

En Cerro Lindo, la mineralización está emplazada en tres corredores alineados con orientación noroeste y buzamiento al suroeste, donde se ubican los diferentes cuerpos mineralizados. El yacimiento cuenta con seis cuerpos principales (OB-1, OB-2, OB-3-4, OB-5, OB-6 y OB-7), además de cuerpos menores como OB-2A, OB-5A, OB-6A y OB-6B. La formación del depósito se atribuye a tres pulsos de deposición de sulfuros: el primero generó cuerpos como OB3-4 y OB6A, el segundo conformó cuerpos más continuos como OB2 y OB5, y el tercero originó OB1. Un posible pulso anterior podría haber formado OB8, aún no bien definido.

La distribución mineralógica sugiere que la fuente de sulfuros proviene de la quebrada Topara. La calcopirita y la pirita predominan en la base de los cuerpos, mientras que la baritina y la esfalerita se encuentran en la parte superior, mostrando una deposición exhalativa. Se observan evidencias de reemplazamiento en un entorno volcánico félsico activo, con enclaves de rocas volcánicas dentro del depósito.

Figura 9

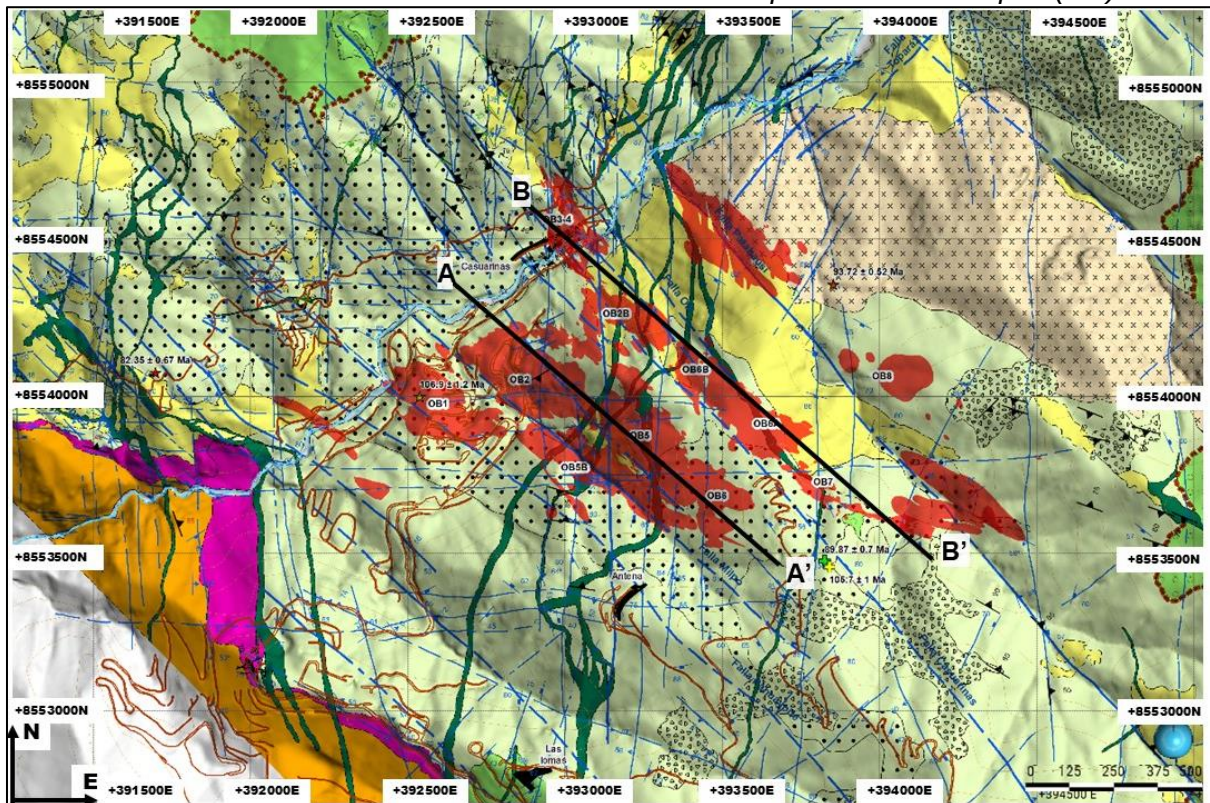
Zinc-baritina bandeados



Fuente: NEXA Resources

Figura 10

Corredores con dirección NW-SE donde se encuentran emplazados los cuerpos (OB)



Fuente: NEXA Resources

3.1.2 Zoneamiento

En Cerro Lindo se observa un zoneamiento vertical que se divide en diferentes áreas mineralizadas.

En la Zona de Gossan, se encuentran óxidos de hierro como hematita, jarosita y goethita, formados por la oxidación y lixiviación de sulfuros. Los sulfuros primarios baríticos aparecen como barita sacaroide con arcillas y ZnCO_3 , mientras que los sulfuros primarios piríticos se presentan como brechas de colapso con óxidos de hierro debido a la descomposición de la pirita, junto con ocurrencias de CuOx (cancantita-brochantita) y covelina $\pm$ calcosina.

La Zona de Sulfuros Primarios se compone de dos horizontes distintos: el Black Ore, dominado por esfalerita, galena y barita, y el Yellow Ore, compuesto por pirita y calcopirita. Estos sulfuros han sido clasificados según su abundancia en tres tipos de sulfuros masivos y uno de sulfuros semi-masivos.

Los sulfuros masivos baríticos bandeados ricos en Zn-Pb-Ag (SPB) contienen más del 50% de los sulfuros totales, con más del 10% de barita. Su mineralización está conformada por esfalerita, calcopirita y galena, donde la plata se encuentra en la galena. Presenta una textura de bandeamiento grueso. Ver figura 11.

Figura 11

Muestras de sulfuros masivos, A) SPB ricos en Zn-Pb-Ag, B) SPB ricos en Cu



Fuente: NEXA Resources

Por otro lado, los sulfuros masivos baríticos homogéneos ricos en Cu (SPB) también contienen más del 50% de sulfuros totales y más del 10% de barita, pero con menor contenido

de pirita en comparación con los SPB ricos en Zn. Su textura es masiva y homogénea, con sulfuros distribuidos en parches gruesos intercrecidos. La marmatita aparece como inclusiones dentro de la calcopirita, y su composición incluye barita, pirita, pirrotita, calcopirita y marmatita.

Los sulfuros masivos de pirita homogénea (SPP) están compuestos casi exclusivamente por pirita, con menos del 10% de barita y calcopirita intersticial. Su textura es homogénea, con granos de tamaño medio a grueso y algo deleznales. La pirita de grano grueso, formada por recristalización, se encuentra cerca de los intrusivos y carece de contaminantes (Hg-As-Sb-Bi), mientras que la pirita de grano medio, más alejada de los intrusivos, presenta contaminación con estos elementos.

Los sulfuros semi-masivos (SSM) contienen entre un 20% y 50% de sulfuros, principalmente pirita de grano medio a fino, distribuida en forma de diseminados, parches y venillas, con presencia ocasional de calcopirita. Su tamaño de grano varía entre 1 mm y 6 mm. Este tipo de mineralización ocurre mayormente en la caja piso del depósito.

Además, dentro de los cuerpos mineralizados se encuentran enclaves de rocas volcánicas alteradas, que representan entre un 2% y 3% del depósito. Estos enclaves tienen tamaños métricos, oscilando entre 0.5 m y 10 m.

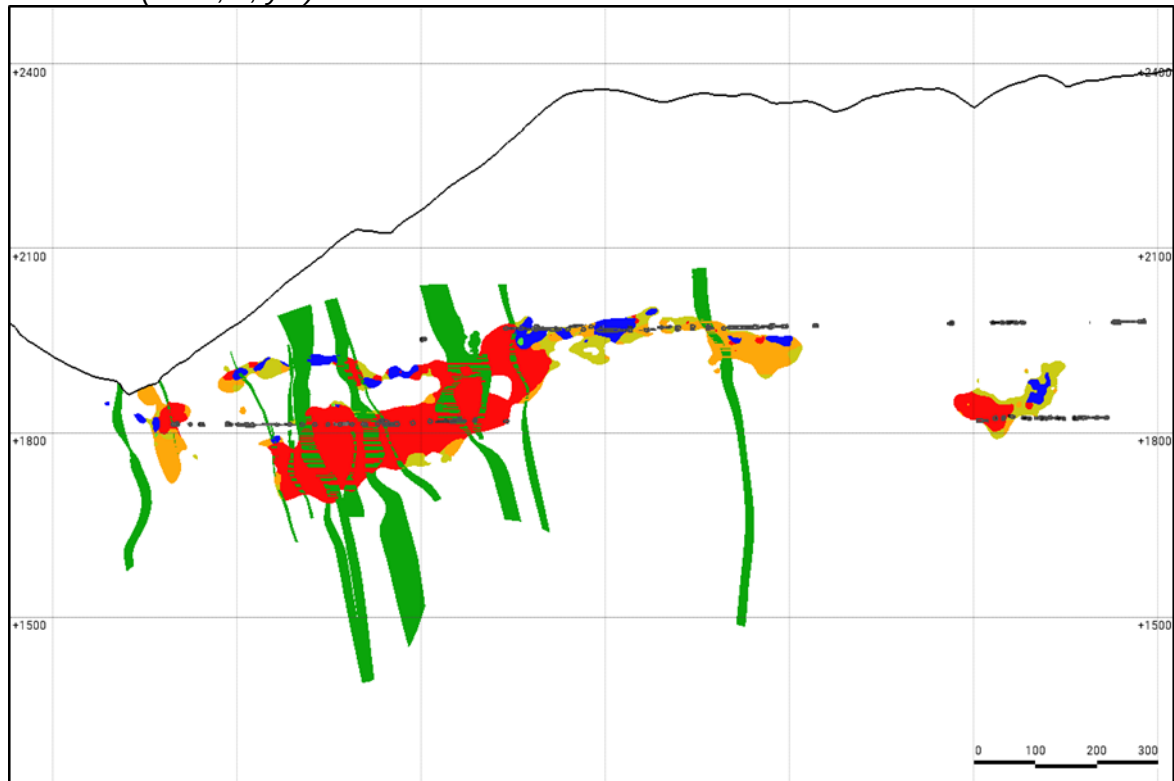
Se han elaborado dos secciones longitudinales (A-A' y B-B') en las Figuras 11 y 12, donde se ilustra el zonamiento de los minerales de Zn, Ag, Cu y Ba dentro de los cuerpos mineralizados.

El zonamiento dentro de los cuerpos mineralizados (OB) se divide en dos zonas principales:

- Zona con Zn-Pb-Ba, donde predominan estos elementos en la parte superior de los cuerpos. Ver figura 12.
- Zona con Fe-Cu, donde el cobre se encuentra principalmente en la parte inferior y en la caja piso de los cuerpos. Ver figura 13.

Figura 12

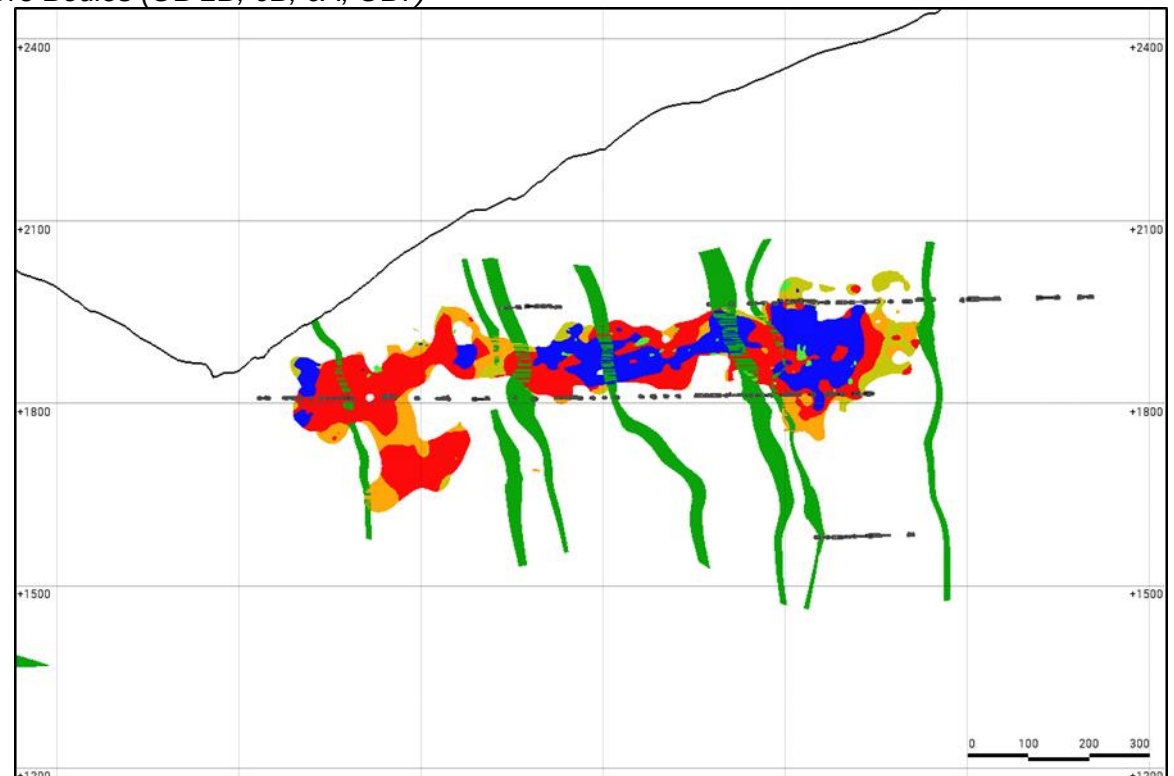
Ore Bodies (OB 2, 5, y 6)



Fuente: NEXA Resources

Figura 13

Ore Bodies (OB 2B, 6B, 6A; OB7)



Fuente: NEXA Resources

3.1.3 Litologías en sulfuros masivos

En Cerro Lindo se han identificado tres tipos de litologías de sulfuros masivos, donde la combinación de sulfuros y baritina supera el 50%. Ver figura 14.

Los sulfuros baríticos zincíferos bandeados (SBZ) contienen entre un 10% y 60% de baritina, con esfalerita de color marrón-castaño (2%-60%), pirita (30%-80%), galena (0%-10%) y calcopirita (0%-5%). Su textura es granular gruesa y bandeda. La ley promedio de zinc en el SBZ es de 5.3%, con un máximo de 28.9%, y su contenido de cobre es del 0.6%. Su espesor varía entre 20 y 150 metros, con buena continuidad lateral. Esta litología alberga el 85% de las reservas del yacimiento.

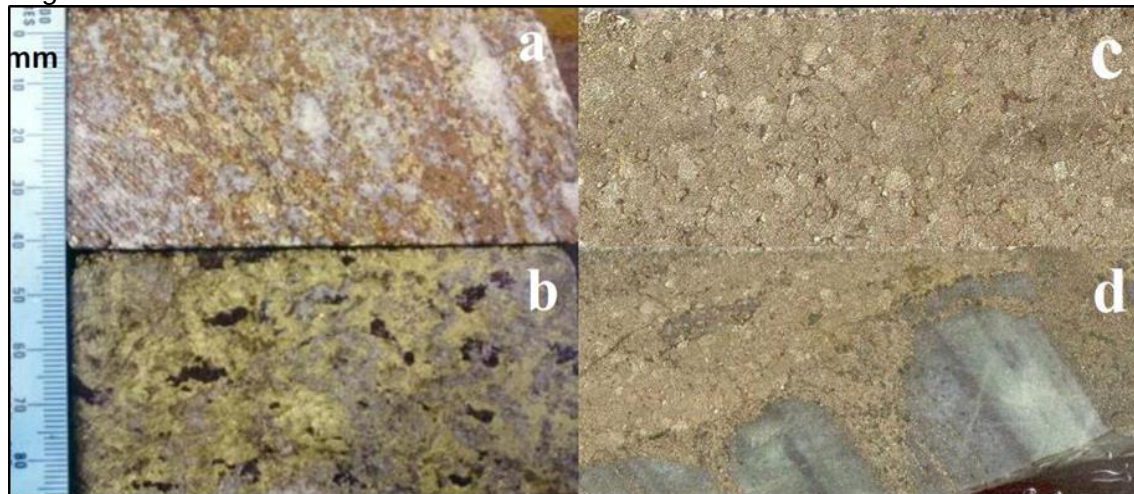
Los sulfuros baríticos cupríferos (SBC) presentan una composición de baritina (10%-60%), pirita (10%-40%), calcopirita (1%-30%), esfalerita marrón oscura marmatítica (1%-8%) y pirrotina (1%-5%). Su textura es homogénea, con bandeamiento difuso o inexistente, lo que indica que su formación ocurrió a temperaturas más altas que el SBZ. La calcopirita, esfalerita ferrífera y pirrotina son contemporáneas y reemplazan a la pirita y la baritina. En los bordes del SBZ es donde típicamente se encuentra desarrollado el SBC, con un espesor que varía entre 2 y 7 metros. A pesar de su importancia para la interpretación genética del yacimiento, su volumen es menor y no tiene un impacto significativo en los recursos.

Los sulfuros piritosos (SP) están compuestos mayormente por pirita gruesa (>90%), con menos de un 10% de baritina y calcopirita intersticial en una proporción del 0% al 20%. Su textura es homogénea y de grano grueso. La ley promedio de cobre en los SP es de 0.8% (máximo 12.0%) y de zinc es de 0.6%. Su espesor varía entre 10 y 150 metros.

Los cuerpos mineralizados de Cerro Lindo se organizan en secuencias deposicionales que incluyen, de techo a piso, SBZ, SBC y SP. Estas secuencias pueden agruparse en dos eventos: Lower Barite (LB) y Upper Barite (UB). El LB se encuentra en los cuerpos C-5 y C-2, con espesores de 10 a 50 metros, mostrando buena continuidad lateral y altas leyes de zinc. En contraste, el UB está presente solo en el cuerpo C-2, donde desarrolla un mayor espesor (hasta 120 metros), pero con menores leyes de zinc.

Figura 14

Litologías en los sulfuros masivos de Cerro Lindo



Nota: a) Sulfuros baríticos zincíferos bandeados (SBZ), b) sulfuros baríticos cupríferos (SBC), c) sulfuros piritosos (SP), d) sulfuros semimasivos. Se aprecian stringers de pirita cortando tufos silicificados. Escala en milímetros. Fuente: NEXA Resources

3.1.4 Mineralogía

Se han realizado estudios mineralógicos y petrográficos desde el Nivel 1910 hasta el Nivel 1800 para comprender mejor la mineralogía del yacimiento. Se han identificado minerales como pirita, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita, cobre gris, marcasita, así como en menor proporción estibina, rutilo, ilmenita, limonitas, magnetita, bornita y covelina.

La pirita es el mineral dominante en el yacimiento y, junto con la baritina, define la clasificación de las litologías. En los sulfuros baríticos bandeados (SPB), la pirita presenta una textura granular piritoédrica con tamaños de grano entre 0.3 mm y 3.0 mm, formando bandeamientos con la barita y la esfalerita. En los sulfuros piritosos (SPP), la pirita se presenta con cristales bien definidos y disgregables, con tamaños de grano de 0.1 mm a 8.0 mm, predominando los de 1 a 2 mm. En las galerías, la pirita estéril ha sido identificada como el último evento de mineralización, cortando unidades de SPB a través de fallas difíciles de detectar en sulfuros masivos. En los sulfuros semi-masivos (SSM), la pirita se encuentra con cristalización de grano fino a medio, acompañado de sílice en el techo y de barita en menor cantidad. Cuando la pirita en SSM es producto de una invasión vertical o lateral en rocas volcánicas bajo el fondo marino, aparece diseminada y en venillas delgadas en la caja piso.

La baritina es el segundo mineral más abundante en el yacimiento y su contenido es clave para la clasificación de litologías. Predomina en los SPB con un contenido superior al

10%, aunque también se encuentra en SPP como vestigios de SPB más antiguos que fueron absorbidos en su formación. En algunos casos, la baritina también aparece en la caja techo, ocasionalmente acompañada de mineralización de zinc. Los granos de baritina en SPB varían en tamaño desde menos de 1 mm hasta 2 mm y forman las bandas mineralizadas características de esta unidad.

3.1.4.1 Esfalerita. La esfalerita se encuentra principalmente en los Sulfuros Primarios Baríticos (SPB), donde presenta una textura granular masiva y bandeada con un color castaño (blenda rubia). Sus granos varían en tamaño entre 0.2 mm y 1.5 mm, predominando los de 0.8 mm. También puede aparecer asociada a la calcopirita en los SPB y SPP, donde adopta formas irregulares de hasta 15 mm y un color marrón oscuro (variedad marmatítica). Se ha identificado un mayor contenido de esta variedad en los SPB en comparación con los SPP, lo que sugiere un proceso de removilización y redepositación a mayor temperatura, aumentando su contenido de hierro.

En los sulfuros semi-masivos (SSM), la esfalerita puede presentarse en forma granular diseminada o bandeada junto con baritina y sílice, alcanzando concentraciones económicamente viables. En algunos casos, estas unidades pueden representar una gradación lateral de los SPB. También se han identificado pequeñas cantidades de esfalerita diseminada en la caja techo (HW), con tamaños de grano entre 0.1 mm y 0.3 mm, y una coloración amarillenta o verdosa, con un contenido máximo de hasta el 3% en toda la roca.

3.1.4.2 Calcopirita. La calcopirita se encuentra comúnmente en los SPP y SPB, ocupando intersticios intergranulares y adoptando formas irregulares. Su tamaño y distribución dependen del grado de reemplazo de la unidad original, pudiendo formar zonas mineralizadas de hasta 6 metros con contenidos de 15% a 60% de calcopirita (CL-00-69). En estos casos, la pirita ha sido intensamente reemplazada, mientras que la baritina permanece casi intacta en comparación con su contenido promedio en los SPB.

Existe una tendencia al aumento de la concentración de calcopirita alrededor de enclaves y unidades volcánicas, que podrían representar enclaves de gran tamaño. Esta mineralización varía en potencia desde 15 cm hasta 80 cm, siendo poco frecuente que supere

1 metro. En los SSM de la caja piso, la calcopirita aparece disseminada en la roca volcánica y como relleno en venillas, acompañada principalmente por pirita, ocasionalmente por pirrotita y muy raramente por esfalerita.

3.1.4.3 Galena. Dentro de los Sulfuros Masivos se encuentra galena en SPB en granos de 0.3 a 1.5 milímetros y su abundancia, al parecer, está relacionado a la abundancia de la esfalerita clara o blenda rubia (se ha encontrado mayor concentración de galena relacionado a altas concentraciones de esfalerita).

También se ha reconocido galena en la caja techo (HW), donde se presenta disseminada y en muy escasa cantidad (menos de 1%) que no llega a ser económica.

3.1.4.4 Pirrotita. La pirrotita se presenta masiva, con formas irregulares alargadas, remplazando a los minerales anteriores, con fuerte asociación con la calcopirita y la esfalerita marmatítica. Es posible también encontrarla disseminada o como relleno de intersticios en unidades SPP.

3.1.4.5 Calcita. Se ha reconocido calcita principalmente dentro de las unidades SPB y en menor cantidad en la unidad SPP. En SPB se encuentra calcita como concentraciones irregulares alargadas de diferentes dimensiones, con corridas en el taladro de 1 a 15 centímetros, pero que en forma vertical (tomando en cuenta la posición original de los SM) no abarca mucha potencia y sus ocurrencias no tienen mucha continuidad. En SPP la calcita es más rara y se la reconoce relleno de intersticios y fracturas.

3.1.5 Alteración

Las rocas intrusivas del Batolito de la Costa provocaron un metamorfismo regional en las rocas volcánicas encajonantes, transformándolas mayormente en hornfels con una mineralogía compuesta por cuarzo, feldespatos, Muscovita, biotita y andalucita. Estas presentan texturas que van desde porfidoblásticas con clastos de diferentes tamaños hasta granoblásticas. La andalucita es más abundante en la caja piso del yacimiento de sulfuros masivos, posiblemente debido a una alteración hidrotermal sílica-potásica más intensa en esta zona. Estudios microscópicos sugieren que la andalucita se formó en las primeras fases del metamorfismo progrado y luego fue reemplazada por Muscovita.

El metamorfismo también provocó un aumento en el tamaño de grano dentro de los sulfuros masivos, alcanzando entre 2 y 5 mm. Este incremento es significativo en términos económicos, ya que mejora el grado de liberación de los minerales durante el procesamiento metalúrgico. Las rocas encajonantes, que originalmente consistían en tufos de ceniza, tufos lapilli y lavas de composición riolítica a dacítica, han sufrido metamorfismo, presentando texturas que varían desde porfidoblásticas hasta granoblásticas. Secciones delgadas clasifican estas rocas metamórficas como gneises a hornfels, con mineralogía de cuarzo, feldespatos, Muscovita, biotita y andalucita.

Además, se desarrolló un metamorfismo de contacto en las secuencias volcano-sedimentarias debido al emplazamiento de intrusiones más jóvenes, como el Batolito de la Costa. Este alcanzó las fases de granate-cordierita-andalucita, con un incremento de andalucita en la parte inferior, posiblemente relacionado con un fuerte ingreso de potasio (sericitización). El metamorfismo generó una textura porfidoblástica secundaria en las rocas volcánicas, con porfidoblastos ricos en sílice y cordierita, de 0.3 a 1.0 cm, representando entre el 10% y 40% de la matriz, la cual es rica en filosilicatos como biotita o Muscovita, dependiendo del protolito.

3.1.5.1 Alteración hidrotermal en Cerro Lindo. En Cerro Lindo, la alteración hidrotermal afecta las rocas encajonantes, compuestas por riolitas y riodacitas con plagioclasas sódicas, cuarzo y biotita. Figura 15.

Se identifican dos etapas de alteración:

- Hipógena, predominante en la zona, con alteraciones Sericita-Pirita-Cuarzo y Propilítica con clorita.
- Supérgena, relacionada con procesos de oxidación y lixiviación.

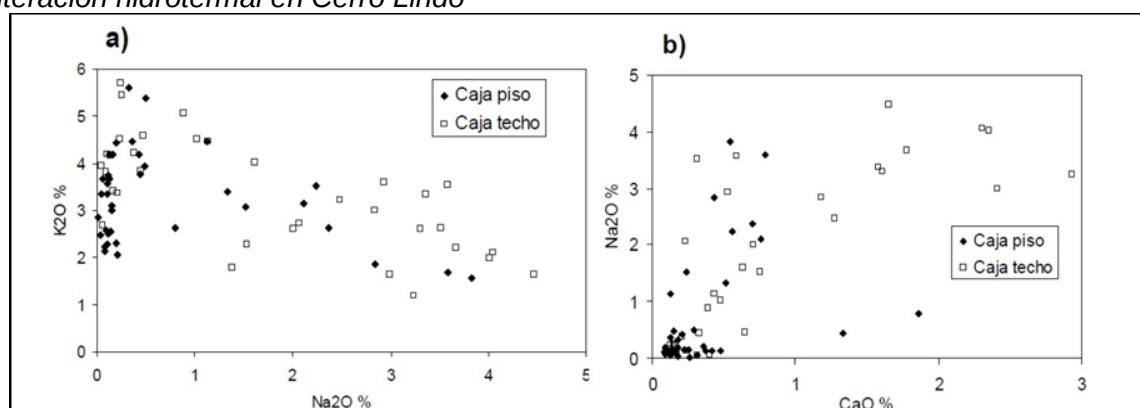
3.1.5.1.1 Sericita-pirita con cuarzo. La alteración hidrotermal predominante es sericita-pirita, extensa y pervasiva, rodeando los cuerpos de sulfuros masivos tanto en la caja techo (HW) como en la caja piso (FW). Se caracteriza por la destrucción de texturas originales y la presencia de silicificación en las cajas. En superficie, la alteración genera una anomalía de color debido a óxidos de hierro como hematita, goethita y jarosita.

La silicificación se encuentra principalmente en la caja piso, asociada a zonas de stockwork y enclaves volcánicos en los sulfuros masivos. Se ha identificado andalucita en la caja piso, reemplazada posteriormente por Muscovita, lo que indica un proceso temprano de metamorfismo hidrotermal.

El patrón de alteración es más intenso en el cuerpo 2, donde las texturas volcánicas son apenas reconocibles. La piritización, en forma de diseminaciones y venillas, se extiende cientos de metros desde el depósito.

Figura 15

Alteración hidrotermal en Cerro Lindo



a) Relación K-Na muestra un incremento de la sericitización (K) a medidas que las rocas pierden en Na. La caja piso es más afectada. b) Relación Na-Ca muestra las fuertes pérdidas en ambos elementos, también más pronunciada en la roca piso. Fuente: NEXA Resources

3.1.5.1.2 Propilítica con clorita. La alteración clorítica, dominada por clorita magnesífera negra, se encuentra en zonas de debilidad y fallas, asociada a calcopirita y pirrotita. Sin embargo, hasta el momento no se ha identificado un gran pipe de alteración. La clorita ferrífera, típica de los depósitos VMS, es escasa y poco desarrollada.

La alteración propilítica, de tonalidad gris-verde oscura, está compuesta por clorita, epidota, calcita y pirita, y se localiza en zonas de fracturamiento y fallamiento. Se ha observado clorita moderada en el piso de los cuerpos OB2B y OB5B, confirmada en estudios de perforación.

Según estudios petrográficos, la biotita en las rocas encajonantes se originó durante el metamorfismo regional y se ha reconocido incluso lejos de los cuerpos de sulfuros masivos.

La andalucita es más frecuente en la caja piso (Foot Wall), en algunos casos formando parte del OB-1. Su presencia en el Hanging Wall es menor y con poca continuidad lateral. Se

relaciona con un alto contenido de aluminio debido a la sericitización intensa o a la alteración hidrotermal con presencia de minerales ricos en aluminio.

3.1.5.2 Alteración supergenea. El intemperismo transforma los minerales originales de las rocas volcánicas, reemplazando los ferromagnesianos por limonitas y los feldespatos por arcillas o sericita, lo que altera sus texturas y colores, dificultando su identificación estratigráfica. Este proceso genera lixiviación y redeposición de elementos, formando horizontes de enriquecimiento secundario y oxidación, típicos en depósitos minerales. Ver figura 16.

En Cerro Lindo, la alteración supérgena es notable y está asociada a la mineralización en profundidad.

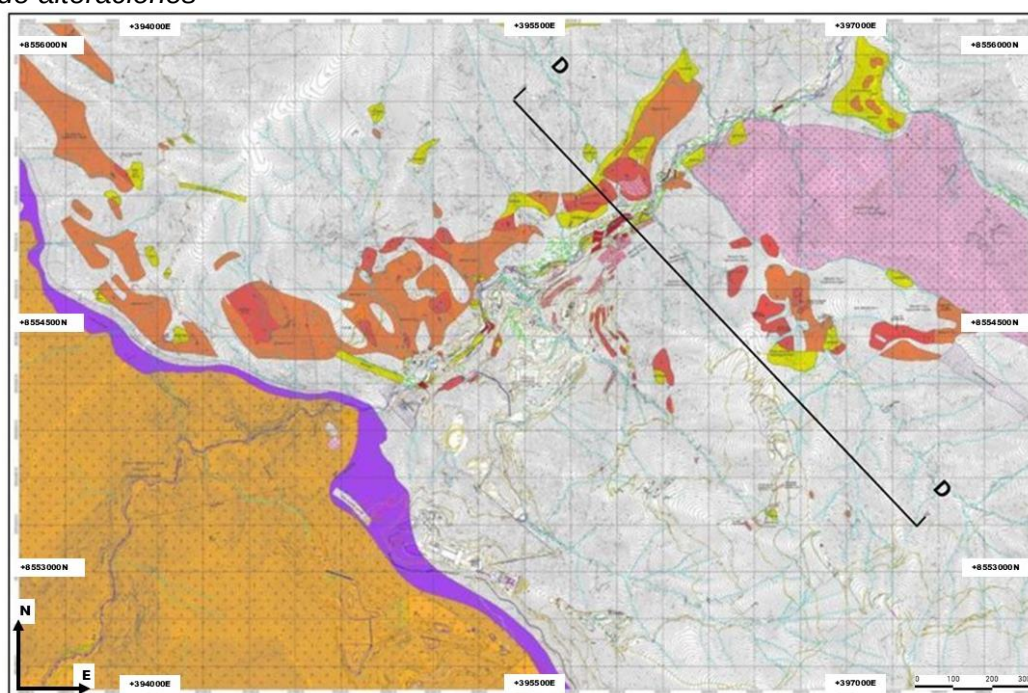
Se han identificado tres niveles de alteración, diferenciados por intensidad y características mineralógicas:

Nivel A en la base; Nivel B intermedia y Nivel C en la parte superior, sobreyaciendo a los niveles se muestran halos silicificados – argilizados con ligero blanqueamiento. (Figura 17)

Encima de estos niveles, se observan halos silicificados-argilizados con ligero blanqueamiento, indicando la presencia de procesos hidrotermales y meteorización avanzada.

Figura 16

Plano de alteraciones



Fuente: NEXA Resources

Figura 17

Vista panorámica donde se observa los tres tipos de alteraciones



Fuente: NEXA Resources

3.2 Caracterización mineralógica del relave

Para determinar la composición y propiedades del relave, se han llevado a cabo diversas técnicas analíticas, incluyendo:

- Análisis químico, para evaluar la composición elemental del material.
- Difracción de rayos X (DRX), con el objetivo de identificar las fases minerales presentes.
- Fluorescencia de rayos X (FRX), utilizada para la cuantificación de elementos mayoritarios y traza.

Estos análisis han permitido obtener información clave sobre la mineralogía, composición química y distribución de elementos en el relave, facilitando así su caracterización y posibles estrategias de recuperación o manejo ambiental.

Tabla 2

Resultados del análisis químico del relave

Código de muestra	% Fe	Ins	S(t)	SiO ₂
Composito 1	30.58	28.80	38.26	17.23

Fuente: Elaboración propia

Se aprecian % considerables de sílice, que al ser abrasivos aumentan el desgaste de la tuberías.

Tabla 3*Resultados de difracción de rayos X del relave*

Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Pirita	FeS ₂	36
Cuarzo	SiO ₂	27
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH, F) ₂	12
Plagioclasa (Oligoclasa)	(Na, Ca) (Al, Si) ₄ O ₈	7
Feldespato-K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	6
Barita	BaSO ₄	3
Clorita (Clinocloro)	(Mg, Fe) ₅ Al (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₈	3
Andalusita	Al ₂ SiO ₃	< L.D.
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	< L.D.
Mica (Biotita)	K (Mg, Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂)	< L.D.
Yeso	CaSO ₄ .2(H ₂ O)	< L.D.
Calcita	CaCO ₃	< L.D.

Fuente: Elaboración propia

La presencia de altos % de Muscovita afecta la viscosidad del relleno, de igual manera los feldespatos generan abrasión en tuberías.

Tabla 4*Resultados de fluorescencia de rayos X del relave*

Elemento	%
Fe	19.87
S	18.76
Si	17.88
Al	6.83
Ba	2.43
K	2.21
Mg	1.39
Ca	0.95
Na	0.59
Ti	0.14
Cu	0.09
Zn	0.08
Mn	0.07
Zr	0.06
Sr	0.04
P	0.03
Pb	0.03
Cl	0.02

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis granulométrico y de gravedad específica. Ver figura 18.

Tabla 5

Resultados de análisis granulométrico del relave

Malla		Peso (g)	Ret. (%)	Ac. (+)	Ac. (-)	80% Pass
ASTM	Abertura (um)					
30	600	2.50	0.25	0.25	99.75	0
50	300	25.80	2.59	2.84	97.16	0
70	212	87.90	8.81	11.65	88.35	172
100	150	134.90	13.52	25.17	74.83	0
140	106	161.60	16.20	41.37	58.63	0
200	75	94.80	9.50	50.87	49.13	0
270	53	127.10	12.74	63.61	36.39	0
325	44	34.80	3.49	67.10	32.90	0
400	32	33.70	3.38	70.48	29.52	0
-400	-32	294.50	29.52	100.00	0.00	0
Total		997.60	100.00	P80 (um)		172

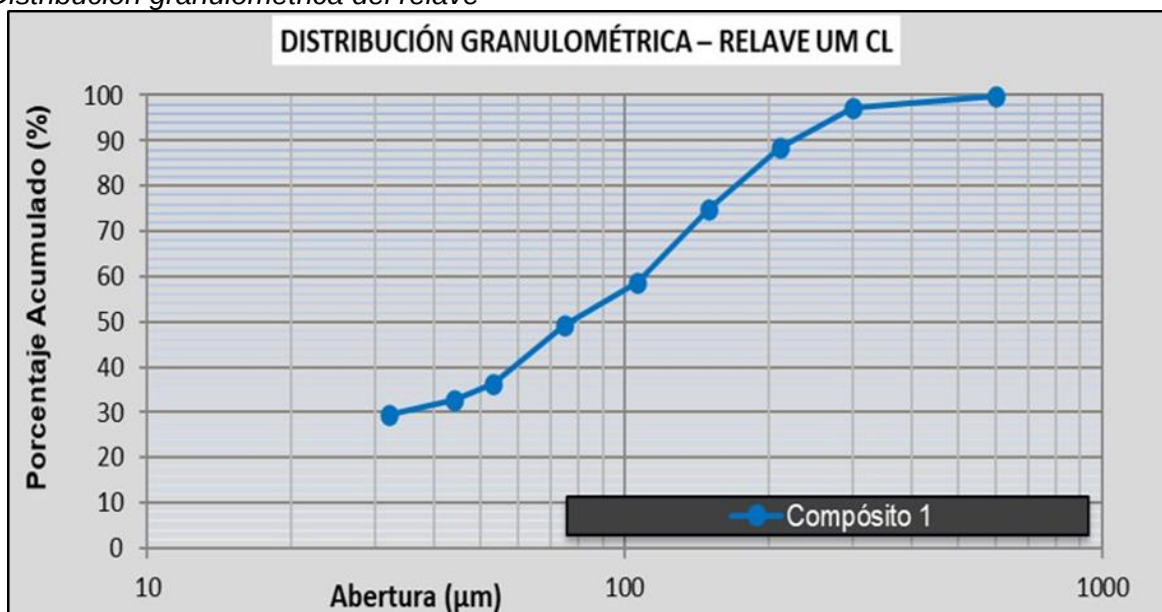
Fuente: Elaboración propia

De la muestra analizada se obtuvo.

- Gravedad específica promedio = 4.00

Figura 18

Distribución granulométrica del relave



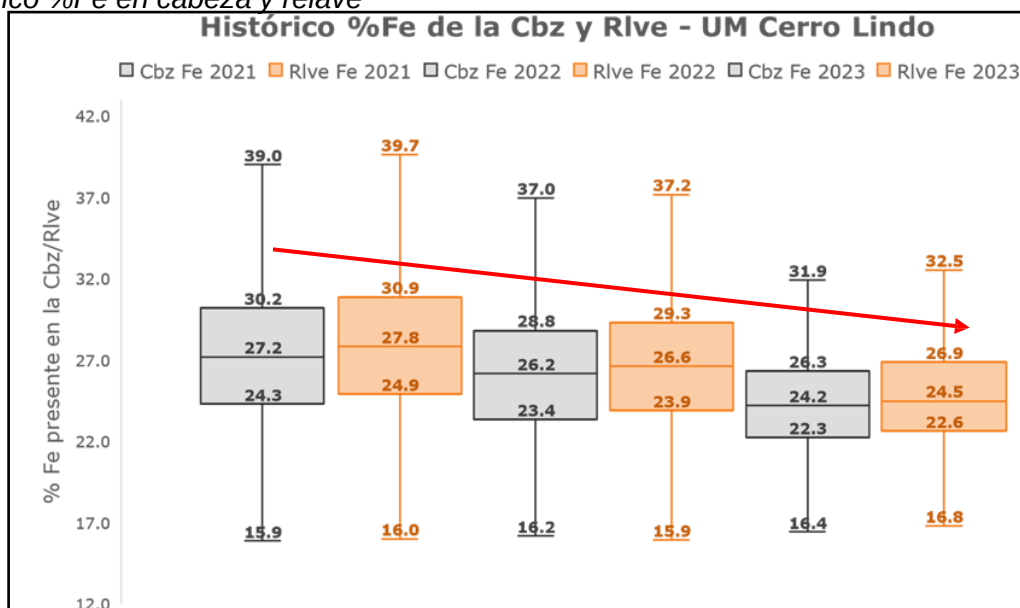
Fuente: Elaboración propia

3.2.1 % Fe en el relave

Analizando la data histórica de la planta concentradora correspondiente al período 2021-2023, se observa una tendencia decreciente en los valores de %Fe en cabeza y en relave. Ver figura 19.

Figura 19

Histórico %Fe en cabeza y relave



Fuente: Elaboración propia

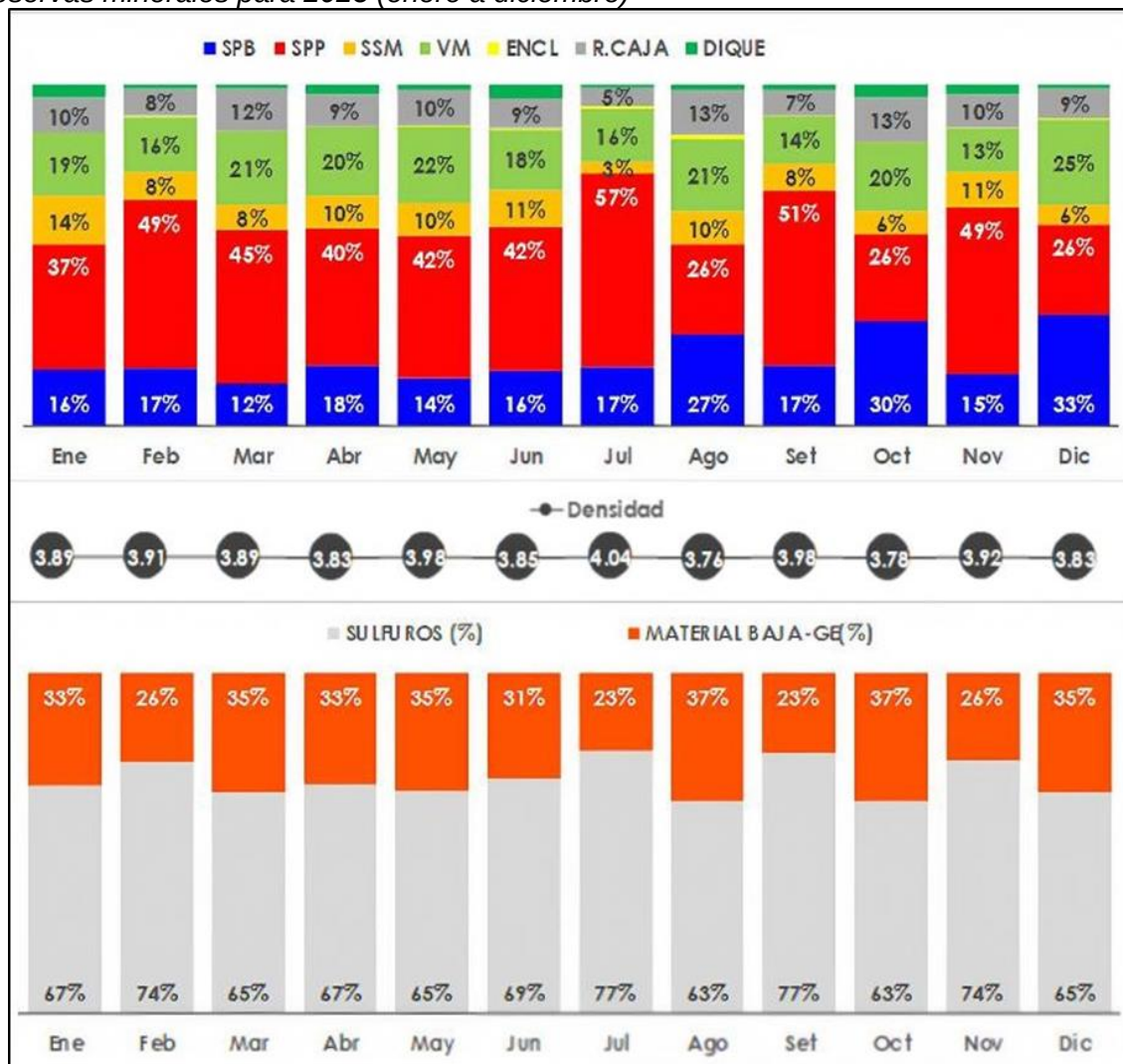
Se observa una tendencia a la baja de pirita, pero considerando los valores obtenidos anteriormente se aprecia una tendencia de aumento de silice, Muscovita, oligoclasa y ortoclasa; lo que genera problemas de bombeabilidad.

- Muscovita es un mineral laminar que afecta la viscosidad de la pasta generando segregación y obstrucción de tuberías.
- Feldespatos (oligoclasa, ortoclasa) son abrasivos aumentando el desgaste en las tuberías.

3.2.2 Análisis de reservas minerales.

Figura 20

Reservas minerales para 2023 (enero a diciembre)



Fuente: Elaboración propia

$$\%FeS_2 = \alpha(SP, SPP, SSM)$$

$$\%Fe = \frac{PM_{(Fe)}}{PM_{(FeS_2)}} * \%FeS_2$$

- $PM_{(Fe)} = 56 \text{ g/mol}$
- $PM_{(FeS_2)} = 120 \text{ g/mol}$

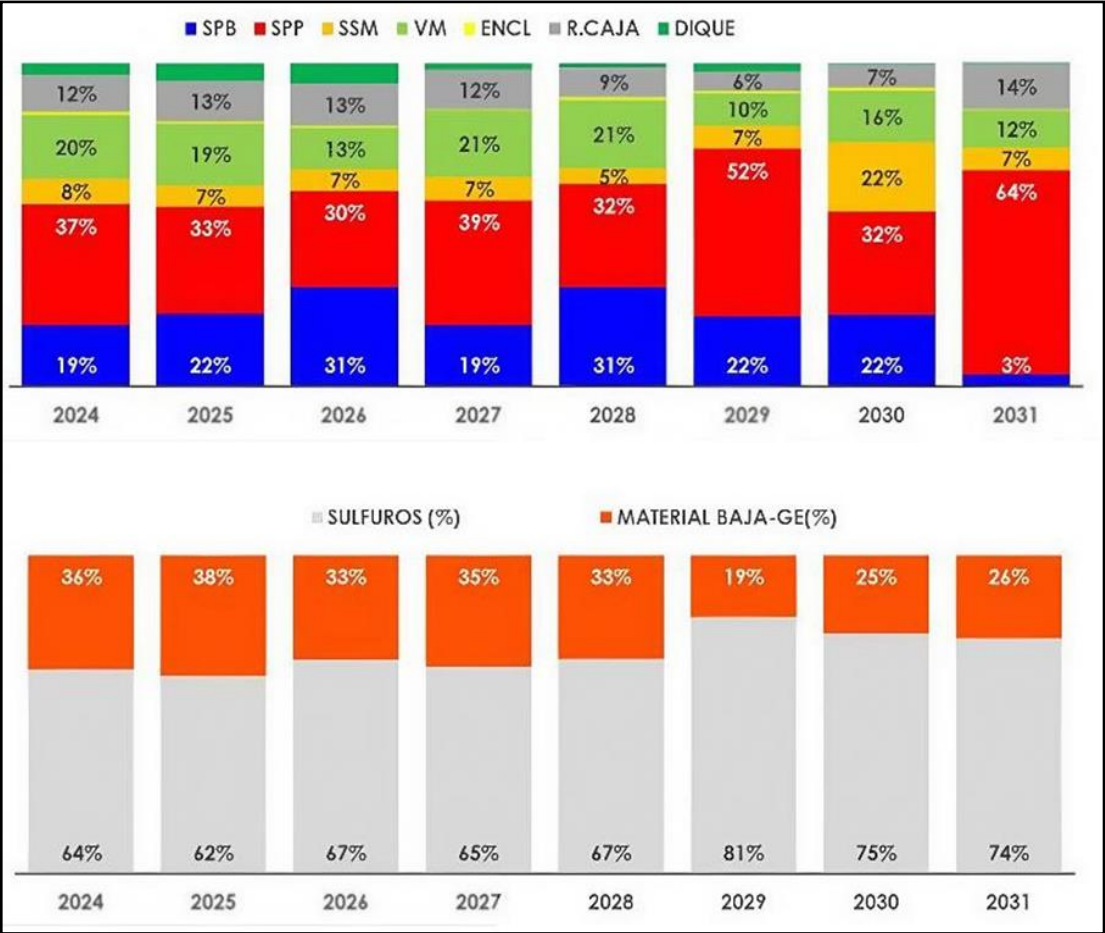
$$\%FeS_2 = \alpha(SP, SPP, SSM)$$

$$\%FeS_2 = SFS \times 77.63\%$$

$$\%FeS_{2Rlve} = \%FeS_{2Cab} \times (1 + 1.55\%)$$

Figura 21

Reservas minerales desde 2024 – 2031



Fuente: Elaboración propia

Usando la información anterior se obtiene una proyección de %Fe y %FeS2 del relave. Ver figura 22.

Tabla 6

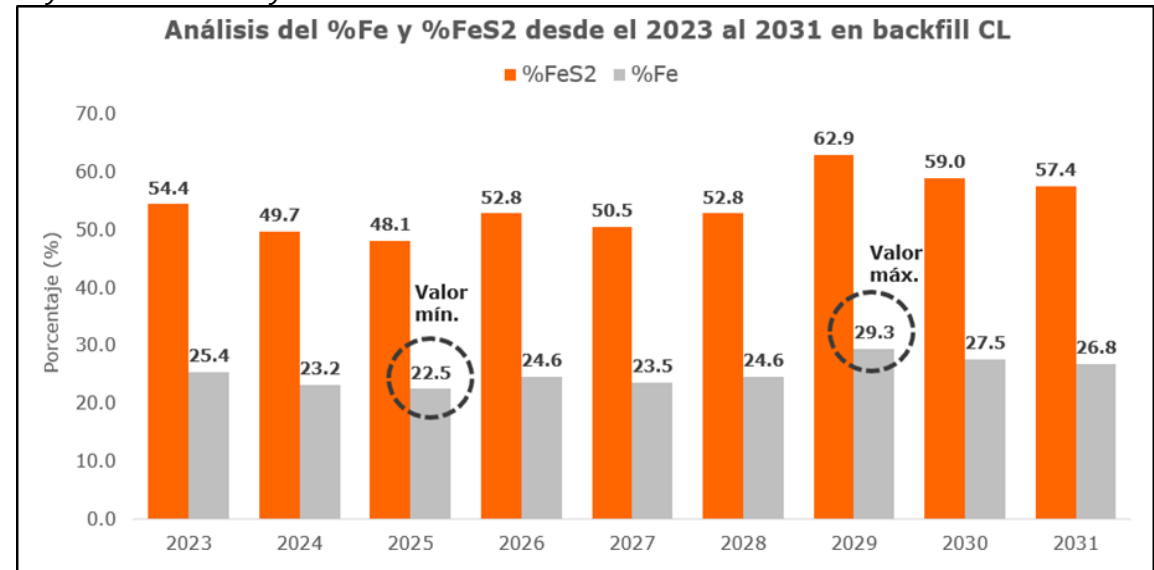
Proyección del %Fe y %FeS2 del relave

Año	%FeS2	%Fe
2023	54.40	25.39
2024	49.69	23.19
2025	48.13	22.46
2026	52.79	24.64
2027	50.46	23.55
2028	52.79	24.64
2029	62.80	29.35
2030	59.00	27.53
2031	57.45	26.81

Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Proyección del %Fe y %FeS2 del relave



Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Análisis de muestras del clarificador

Figura 23

Muestras del clarificador analizadas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7

Resultado de análisis químico de muestras del clarificador

Código de muestra	% Fe	Ins	S(t)	SiO2
Mixer sin clarificador	20.36	39.58	24.11	26.18
Clarificador + agua	17.05	48.63	20.40	32.55

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Resultado de análisis ICP de muestras del clarificador*

Código de muestra	Ag ppm	Al ppm	As ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm
Mixer sin clarificador	6.80	3.98	84.00	2303.00	0.80	<5
Clarificador + agua	8.90	5.27	62.00	1360.00	0.80	<5
Código de muestra	Ca %	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Fe %
Mixer sin clarificador	3.13	4.00	39.00	90.00	540.00	>15
Clarificador + agua	1.11	7.00	29.00	76.00	762.00	>15
Código de muestra	Ga ppm	K %	La ppm	Mg %	Mn ppm	Mo ppm
Mixer sin clarificador	<10	1.20	2.40	0.73	588.00	4.00
Clarificador + agua	14.00	1.64	1.40	0.98	818.00	6.00
Código de muestra	Na %	Nb ppm	Ni ppm	P %	Pb ppm	S %
Mixer sin clarificador	0.43	<1	16.00	0.03	497.00	>10
Clarificador + agua	0.62	<1	15.00	0.04	471.00	>10
Código de muestra	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Sr ppm	Ti %	Tl ppm
Mixer sin clarificador	15.00	5.20	<10	106.00	0.07	6.00
Clarificador + agua	20.00	6.90	<10	77.50	0.08	18.00
Código de muestra	V ppm	W ppm	Y ppm	Zn ppm	Zr ppm	
Mixer sin clarificador	73.00	<10	6.60	761.00	43.90	
Clarificador + agua	112.00	<10	6.60	1066.00	38.50	

Fuente: Elaboración propia

3.3 Inicio de pruebas con cemento del mercado (INKA)**3.3.1 Diseño de relleno en pasta**

Para el secuenciamiento dentro del Sub Level Stopping, la resistencia de la pasta debe alcanzar 0.64 Mpa a los 28 días de fraguado, con un diseño de 4% de cemento, tanto para tajos primarios, secundarios. Para tajos terciarios, estos pueden tener una resistencia de 0 Mpa. Ver figura 24.

Tabla 9*Parámetros técnicos del relleno*

Parámetros	Valores	Unidad
Densidad de relave	>2350	Kg/cm ³
Porcentaje en sólidos de relave	>74	%
Densidad de pasta	>2450	Kg/cm ³
Porcentaje de sólidos en pasta	>75	%
Cemento	4	%
Granulometría de relave	45 – 48	% Malla -200
Slump	9 ½ - 9 ¾	Pulgadas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

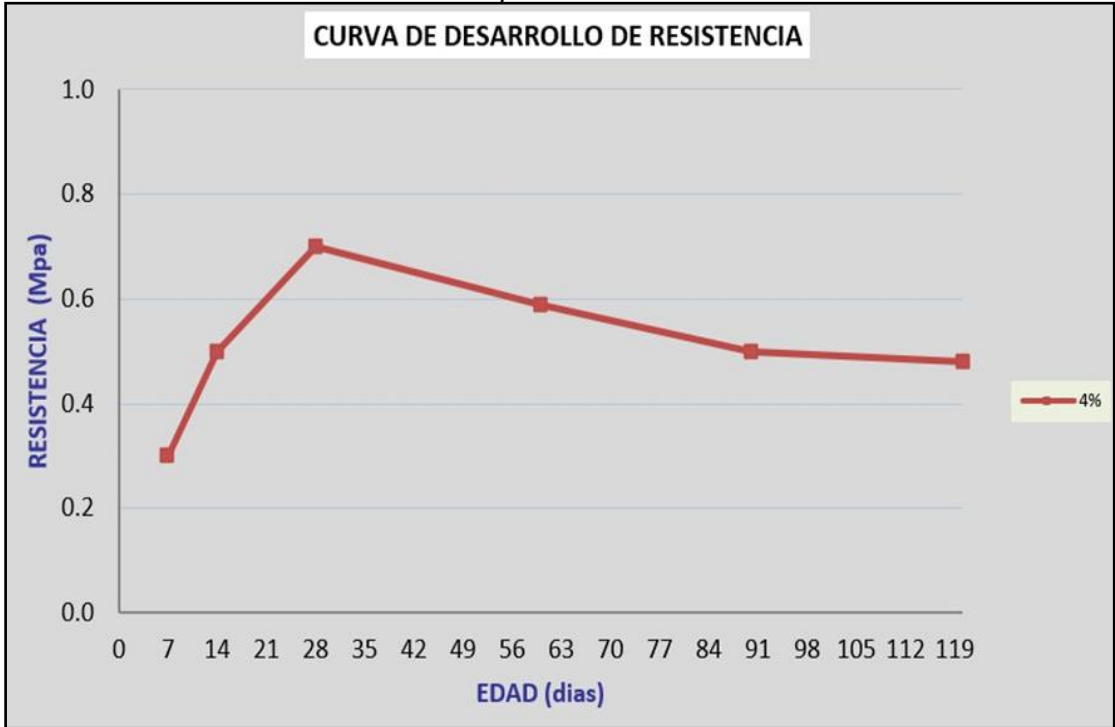
Diseño del relleno en pasta

RESUMEN DISEÑO RELLENO EN PASTA		
Consideraciones		Cemento
Diseño		4%
Proporción materiales por metro cubico		
Cemento	Kg/m ³	99
Relave	Kg/m ³	1858
Agua	L/m ³	545
Densidad de relleno	Kg/m ³	2502
Resultados obtenidos en días		
Slump	Pulgadas	9 ½ "
Densidad de relleno	Kg/m ³	2502
Resistencia promedio a 7	MPa	0.80
Resistencia promedio a 14	MPa	1.04
Resistencia promedio a 28	MPa	0.97
Resistencia promedio a 60	MPa	0.85
Resistencia promedio a 90	MPa	0.79
Resistencia promedio a 120	MPa	0.73

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Curva de desarrollo de resistencia de la pasta



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Análisis histórico de resistencias

Se recopiló la data histórica de la mina de los distintos diseños de relleno (3%, 4%, 5% y 7%) usando el cemento Unacem para tener la línea base. Y al momento de realizar las pruebas con el cemento INKA. Tenemos los siguientes resultados. Ver figuras 25-28.

Tabla 11

Histórico de resistencias – muestreo en superficie

Identificación	% Cemento	Días	Resistencia (MPa)
Planta 01	3% Cemento	7 días	0.35
Planta 01	3% Cemento	14 días	0.45
Planta 01	3% Cemento	28 días	0.41
Planta 01	3% Cemento	60 días	0.33
Planta 01	3% Cemento	90 días	0.28
Planta 01	3% Cemento	120 días	0.26
Planta 01	4% Cemento	7 días	0.50
Planta 01	4% Cemento	14 días	0.68
Planta 01	4% Cemento	28 días	0.67
Planta 01	4% Cemento	60 días	0.47
Planta 01	4% Cemento	90 días	0.39
Planta 01	4% Cemento	120 días	0.34
Planta 01	5% Cemento	7 días	0.68
Planta 01	5% Cemento	14 días	0.96
Planta 01	5% Cemento	28 días	1.00
Planta 01	5% Cemento	60 días	0.68
Planta 01	5% Cemento	90 días	0.56
Planta 01	5% Cemento	120 días	0.51
Planta 01	7% Cemento	7 días	0.61
Planta 01	7% Cemento	14 días	0.96
Planta 01	7% Cemento	28 días	1.17
Planta 01	7% Cemento	60 días	0.79
Planta 01	7% Cemento	90 días	0.59
Planta 01	7% Cemento	120 días	0.49
Planta 02	3% Cemento	7 días	0.34
Planta 02	3% Cemento	14 días	0.42
Planta 02	3% Cemento	28 días	0.35
Planta 02	3% Cemento	60 días	0.30
Planta 02	3% Cemento	90 días	0.24
Planta 02	3% Cemento	120 días	0.22
Planta 02	4% Cemento	7 días	0.40
Planta 02	4% Cemento	14 días	0.52
Planta 02	4% Cemento	28 días	0.50
Planta 02	4% Cemento	60 días	0.34
Planta 02	4% Cemento	90 días	0.29
Planta 02	4% Cemento	120 días	0.26
Planta 02	5% Cemento	7 días	0.57
Planta 02	5% Cemento	14 días	0.87
Planta 02	5% Cemento	28 días	0.92
Planta 02	5% Cemento	60 días	0.67
Planta 02	5% Cemento	90 días	0.42
Planta 02	5% Cemento	120 días	0.38
Planta 02	7% Cemento	7 días	0.72
Planta 02	7% Cemento	14 días	1.08
Planta 02	7% Cemento	28 días	1.36
Planta 02	7% Cemento	60 días	0.63
Planta 02	7% Cemento	90 días	0.43
Planta 02	7% Cemento	120 días	0.42

Fuente: Elaboración propia

Figura 25

Histórico de resistencias por planta – 3% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Histórico de resistencias por planta – 4% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Figura 27

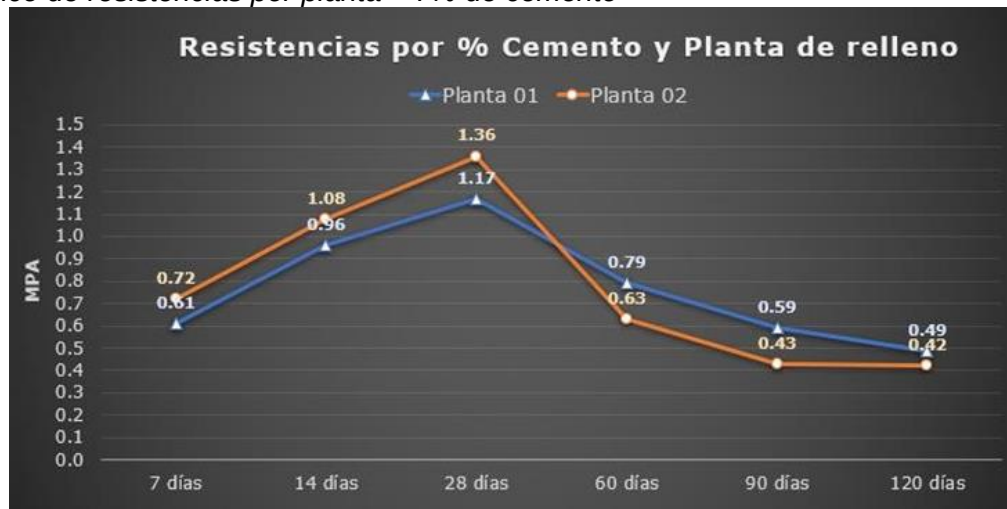
Histórico de resistencias por planta – 5% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Figura 28

Histórico de resistencias por planta – 7% de cemento



Fuente: Elaboración propia

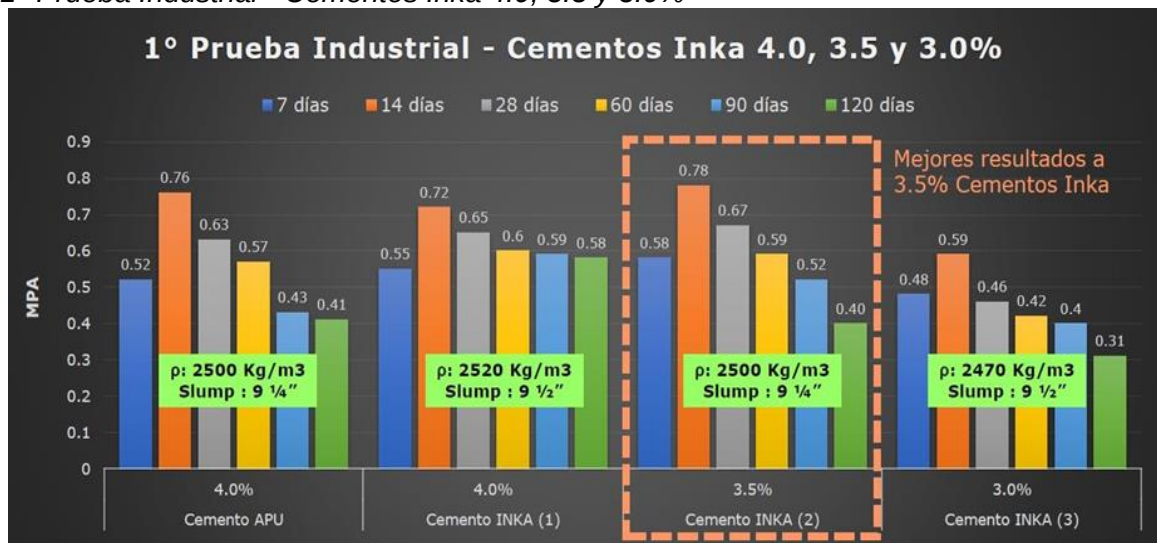
3.3.3 Desarrollo de pruebas industriales

- Se desarrollaron 10 Pruebas Industriales desde Ago a Dic 2022. Ver figuras 29-39.
- Control de variables operativas (Densidad de pasta, slump, agua, tonelaje relave, etc.).
- Reducción del 10% del consumo de cemento en la pasta para aplicación Backfill.
- Pruebas a diferentes porcentajes de cemento.

Tenemos los siguientes resultados

Figura 29

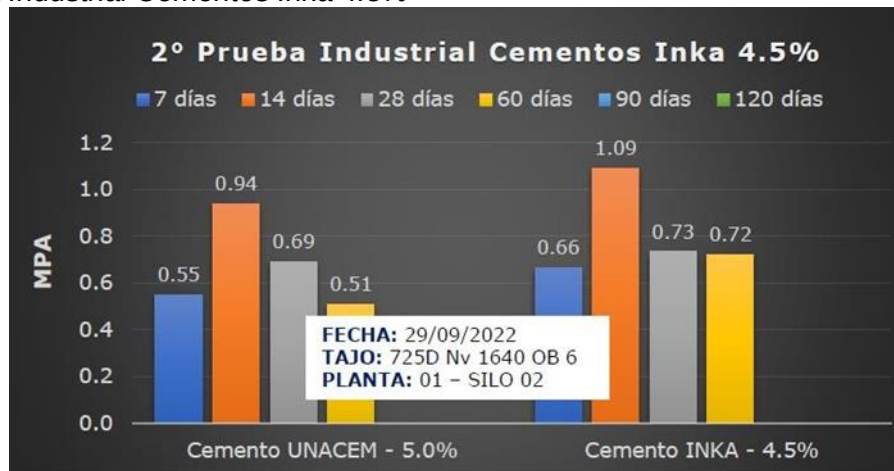
1° Prueba Industrial - Cementos Inka 4.0, 3.5 y 3.0%



Fuente: Elaboración propia

Figura 30

2° Prueba Industrial Cementos Inka 4.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 31

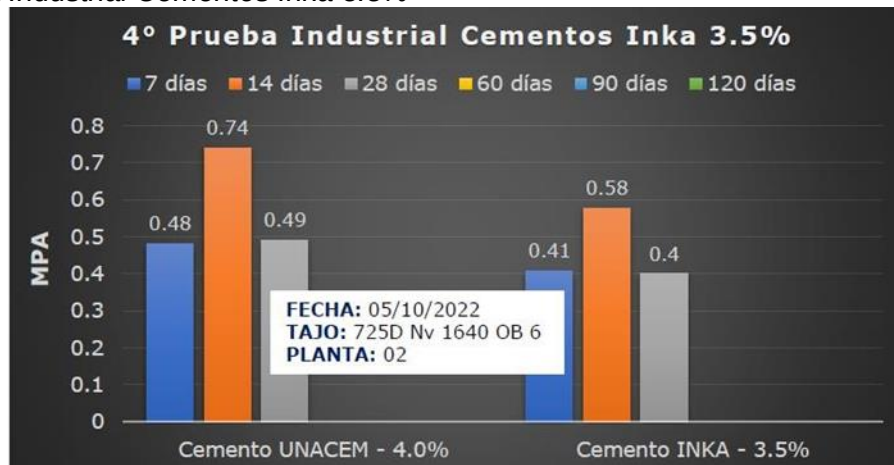
3° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

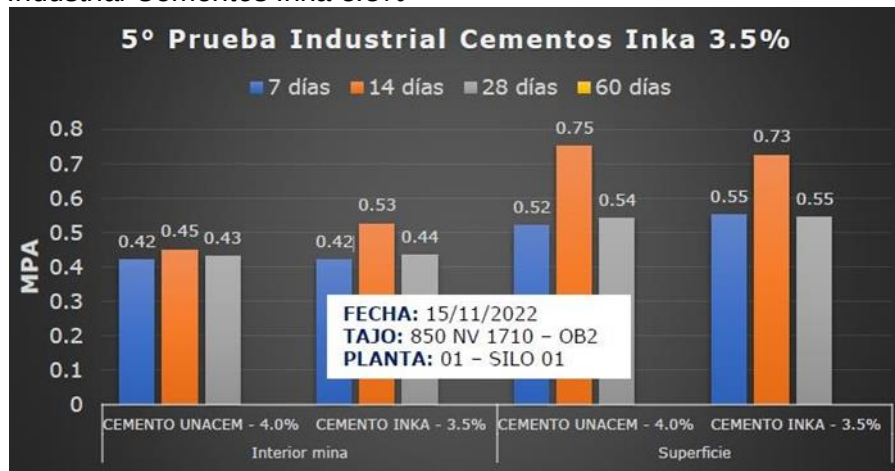
4° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

5° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

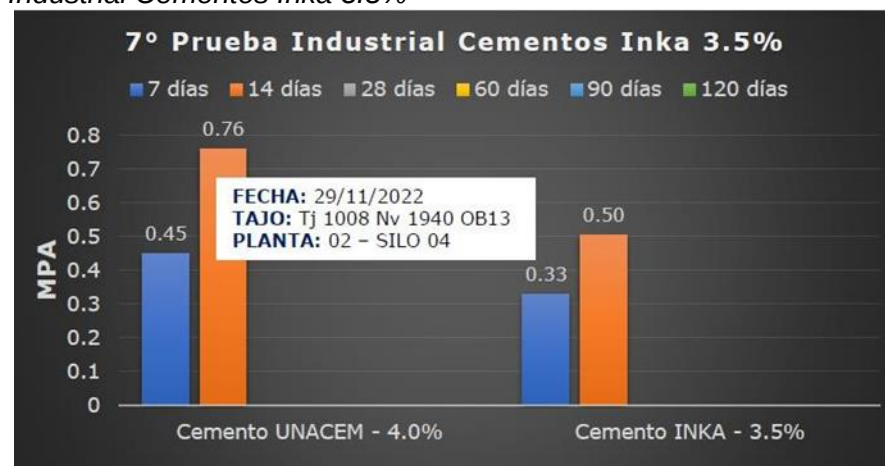
6° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

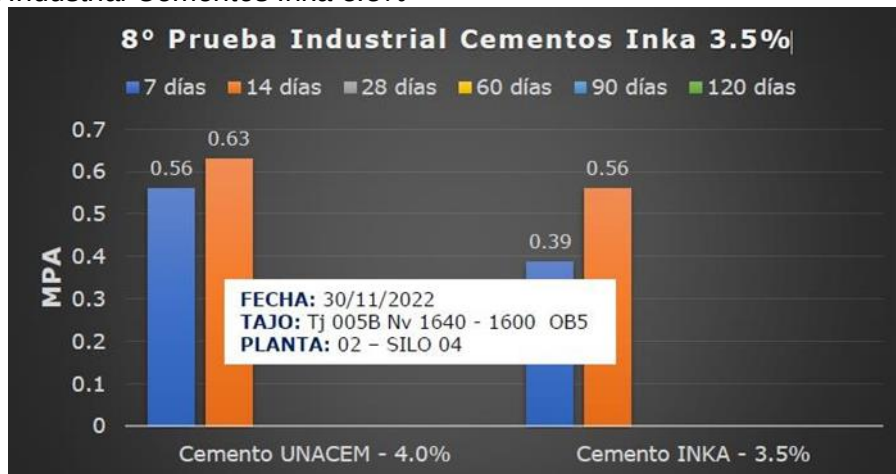
7° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

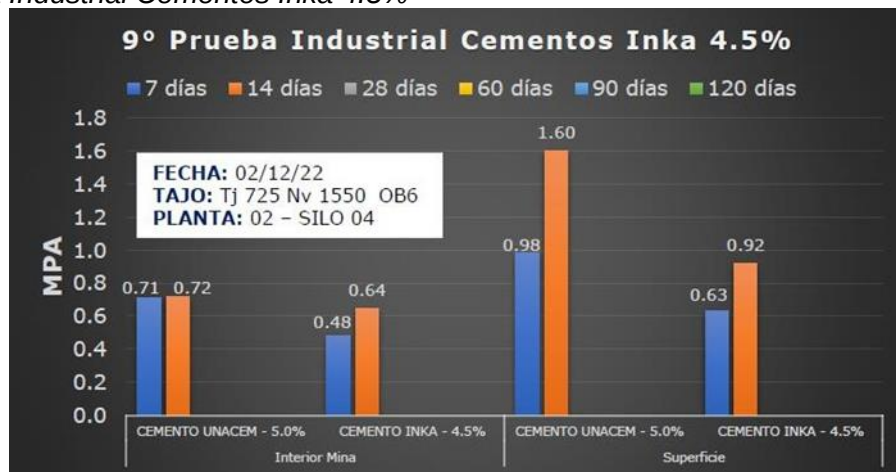
8° Prueba Industrial Cementos Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 37

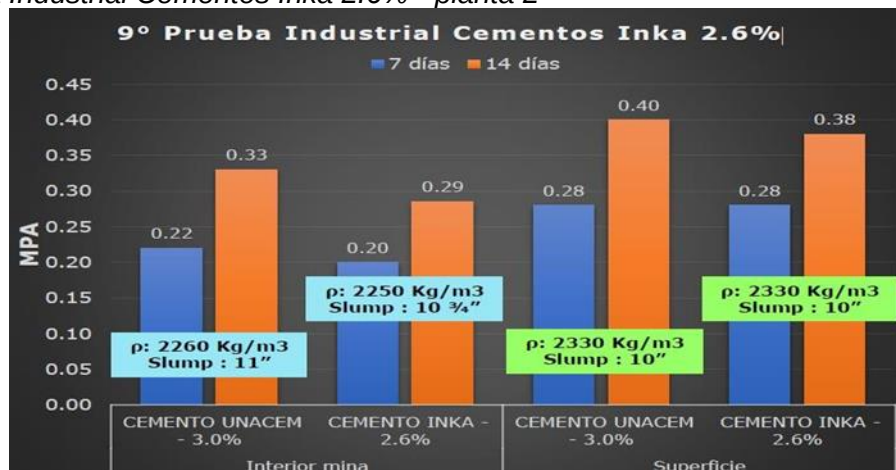
9° Prueba Industrial Cementos Inka 4.5%



Fuente: Elaboración propia

Figura 38

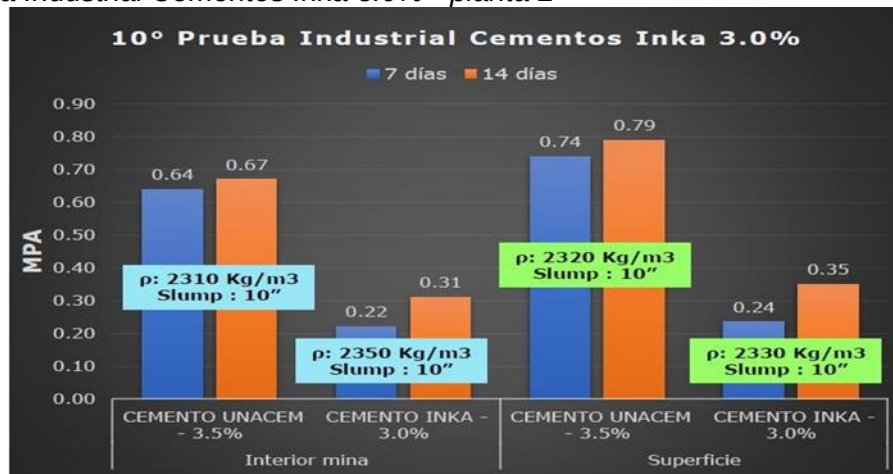
9° Prueba Industrial Cementos Inka 2.6% - planta 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

10° Prueba Industrial Cementos Inka 3.0% - planta 2



Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir de las pruebas:

- De la prueba 1 y 3, el cemento Inka 3.5% obtiene mejores resultados que el cemento Unacem 4.0%.
- De la prueba 2, el cemento Inka 4.5% obtiene mejores resultados que el cemento Unacem 5.0%.
- De la prueba 4, 7 y 8, el cemento Inka 3.5% obtiene resultados menores que el cemento Unacem 4.0%, pero superiores al histórico relativo.
- De la prueba 5, el cemento Inka 3.5% obtiene resultados similares al cemento Unacem 4.0%.
- De la prueba 6, el cemento Inka 3.5% obtiene mejores resultados al cemento Unacem 3.5%.
- De la prueba 9, el cemento Inka 4.5% obtiene resultados menores que el cemento Unacem 5.0%, pero superiores al histórico relativo.
- De la prueba 9 en planta 2, el cemento Inka 2.6% obtiene resultados similares al cemento Unacem 3.0%.
- De la prueba 10, el cemento Inka 3.0% obtiene resultados menores que el cemento Unacem 4.5%, pero superiores al histórico relativo.

En todas las pruebas el cemento Inka en menor concentración muestra resultados similares o mejores al cemento Unacem, lo que significa reducción de consumo de cemento.

Tabla 12

Resumen de pruebas industriales

Resistencia a la compresión a 28 días														
Día	Turno	TMS CABEZA	RELAVE	Ley Cab-Fe	Ley Rel-Fe	C. Inka					C. Unacem			
						2.6%	3.0%	3.5%	4.0%	4.5%	3.0%	3.5%	4.0%	5.0%
18/08/22	A	9,599.31	9,366.74	35.53	35.28	-	0.46	0.67	0.65	-	-	-	0.63	-
29/09/22	A	10,719.99	10,345.42	32.03	25.45	-	-	-	-	0.73	-	-	-	0.69
5/10/22	B	7,577.75	7,320.61	31.01	32.67	-	-	0.54	-	-	-	-	0.71	-
8/11/22	A	9,782.20	9,394.07	24.16	25.42	-	-	0.40	-	-	-	-	0.49	-
15/11/22	B	9,138.68	8,755.19	24.22	27.60	-	-	0.55	-	-	-	-	0.54	-
16/11/22	B	8,657.51	8,270.67	26.01	28.25	-	-	0.53	-	-	-	-	-	-
2/12/22	B	7,911.48	7,659.86	29.01	27.93	-	-	-	-	0.75	-	-	-	1.22
4/12/22	B	6,240.84	6,011.23	30.21	23.91	0.27	0.28	-	-	-	0.25	1.3	-	-

Fuente: Elaboración propia

3.4 Auditoria del sistema de relleno

3.4.1 Problemas de cavitación en la bomba de pasta

Uno de los problemas más graves en la planta de pasta es la cavitación en las bombas de pasta. Esta cavitación provoca un desgaste extremo en las válvulas de clapeta, requiriendo su reemplazo cada cuatro días.

La cavitación ocurre porque las bombas de pasta succionan el material a través de las válvulas de clapeta más rápido de lo que las líneas de alimentación pueden suministrarlo.

Para evitar la cavitación, la línea de alimentación debe contar con un volumen adecuado de pasta disponible, y generalmente debe mantenerse bajo una ligera presión positiva para acelerar el flujo hacia la bomba.

Esto se logra asegurando una longitud suficiente en la línea de alimentación (se recomienda que sea de al menos 5 metros) y un diámetro adecuado que permita un buen flujo de pasta.

Ver figura 40.

Figura 40

Bombas gemelas Putzmeister HSP



Fuente: NEXA Resources

El sistema de alimentación actual en Cerro Lindo no cuenta con una tolva de pasta. Como solución, se sugiere reemplazar las válvulas de clapeta por un sistema de alimentación tipo S-tube, lo que eliminaría la cavitación y reduciría el desgaste de las válvulas.

3.4.2 Control de calidad de la pasta

Algunas de las problemáticas más serias identificadas durante la auditoría están relacionadas con las prácticas actuales de muestreo, curado y ensayo de los cilindros de control de calidad en la mina.

3.4.2.1 Muestreo. Actualmente, se recolectan muestras diarias de pasta para pruebas a los 7, 14, 28, 60, 90 y 120 días. Cada serie consta de cilindros duplicados tomados tanto en la planta de pasta como en el punto de descarga subterráneo. En total, se generan 24 cilindros por día (6 cilindros x 2 duplicados x 2 ubicaciones). Ver figura 41.

El muestreo se realiza utilizando moldes de acero de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura. Después de 24 horas, las muestras son trasladadas al laboratorio subterráneo de pasta, donde se retiran de los moldes de acero para su reutilización.

Figura 41

Muestreo Subterráneo en Moldes de Acero



Fuente: NEXA Resources

Se indica que la razón del muestreo duplicado en la planta y en el área subterránea es que han observado densidades más altas en las muestras subterráneas, aproximadamente 10% superiores a las de la planta.

3.4.2.2 Curado. Como se mencionó anteriormente, las muestras se curan al aire después de ser retiradas de los moldes de acero. Ni la humedad ni la temperatura están controladas, y las condiciones de curado dependen de las condiciones ambientales subterráneas. Figura 42.

Figura 42

Curado de muestras desmoldadas en el laboratorio subterráneo de pasta



Fuente: NEXA Resources

3.4.2.3 Ensayo. El equipo actual para ensayos de pasta consiste en una máquina de ensayo de concreto con control de carga de la marca ELE. Según las especificaciones del fabricante, la velocidad de carga más baja disponible en esta máquina es de 2.5 kN/segundo. Dado que los cilindros de pasta fallan aproximadamente a 20 kN, esto equivale a un tiempo de carga de diez segundos hasta la falla. Ver figura 43.

Figura 43

Máquina de ensayo de compresión ELE



Fuente: NEXA Resources

3.4.3 Distribución de pasta

La reticulación de pasta en Cerro Lindo incluye 2 bombas de pistón Putzmeister por planta (una operativa y otra en reserva) y una red de tuberías de acero al carbono y HDPE que conducen la pasta hasta los realces. Las bombas, de 450 kW y 120 bar, presentan problemas de mantenimiento debido al desgaste de sus válvulas poppet por la abrasividad de los relaves ricos en pirita.

3.4.3.1 Parámetros de flujo. Los operadores de Cerro Lindo reportan una presión de descarga de 50 bar para 1,000 m de reticulación de pasta, con una pérdida por fricción de 5.3 kPa/m y un esfuerzo de fluencia de 190 Pa. El slump objetivo es de 9.5 a 9.75 pulgadas con 75% de sólidos, 4% de cemento y una densidad de 2.45 t/m³. Según la reología inicial, las pérdidas por fricción esperadas serían de 5 kPa/m para un slump de 9.5 pulgadas y 4.5 kPa/m para 9.75 pulgadas.

3.4.3.2 Problemas de sedimentación de sólidos. El flujo actual de 100 m³/h genera una velocidad de 0.95 m/s, lo que provoca sedimentación significativa de sólidos de alta densidad, requiriendo limpiezas semanales. El sistema de lavado actual utiliza un alto volumen a baja velocidad, resultando ineficaz para eliminar los sólidos asentados.

Para evitar la sedimentación, la velocidad del flujo debería ser cercana a 2 m/s. Reducir el diámetro de la tubería a 6 pulgadas aumentaría la velocidad a 1.65 m/s, pero también elevaría las pérdidas por fricción en un 30%, lo que podría no ser viable.

3.4.3.3 Instrumentación. Actualmente, la red de reticulación de pasta en Cerro Lindo carece de instrumentación, lo que impide detectar bloqueos o rupturas en las tuberías. Se recomienda instalar sensores de presión en las tuberías, ubicados después de las bombas de pasta y en la base de cada pozo, para prevenir fallos.

Los datos de presión permitirán calibrar modelos de flujo y optimizar la densidad de sólidos y la resistencia de la pasta. Se sugiere instalar dos manómetros a 100 m de distancia para medir pérdidas por fricción en diferentes mezclas.

Además, se recomienda la instalación de cámaras en puntos clave, como el fondo de los pozos y las barricadas, así como medidores de flujo en zonas propensas a bloqueos. Estos medidores deben estar conectados a válvulas automáticas de descarga para evitar obstrucciones y facilitar la limpieza del sistema.

3.4.4 Consideraciones futuras

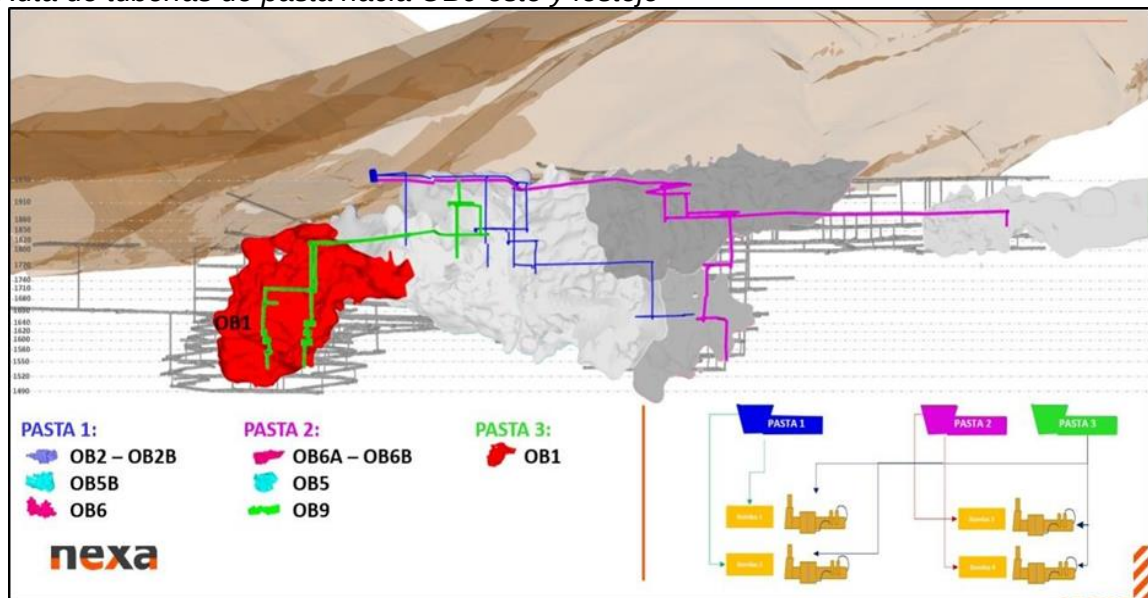
3.4.4.1 Bombas de refuerzo. El sistema actual de pasta ya opera cerca de su límite para bombear a tajos distantes, lo que ha obligado a diluir la pasta para reducir las

pérdidas por fricción. Sin embargo, las futuras zonas de minería requerirán bombear a tajos aún más alejados, como OB9 Este y Festejo.

El costo estimado de una estación de refuerzo es de aproximadamente US\$ 2 millones, incluyendo la bomba, el sistema hidráulico, la tolva de pasta, la instalación eléctrica y tuberías, y los controles del motor (MCC). Si la estación se instala bajo tierra, se deben considerar costos adicionales por la excavación (aproximadamente 5 m de alto x 5 m de ancho x 10 m de largo) y la provisión de servicios como energía y agua, que encarecen aún más la opción subterránea. Ver figura 44.

Figura 44

Ruta de tuberías de pasta hacia OB9 este y festejo



Fuente: NEXA Resources.

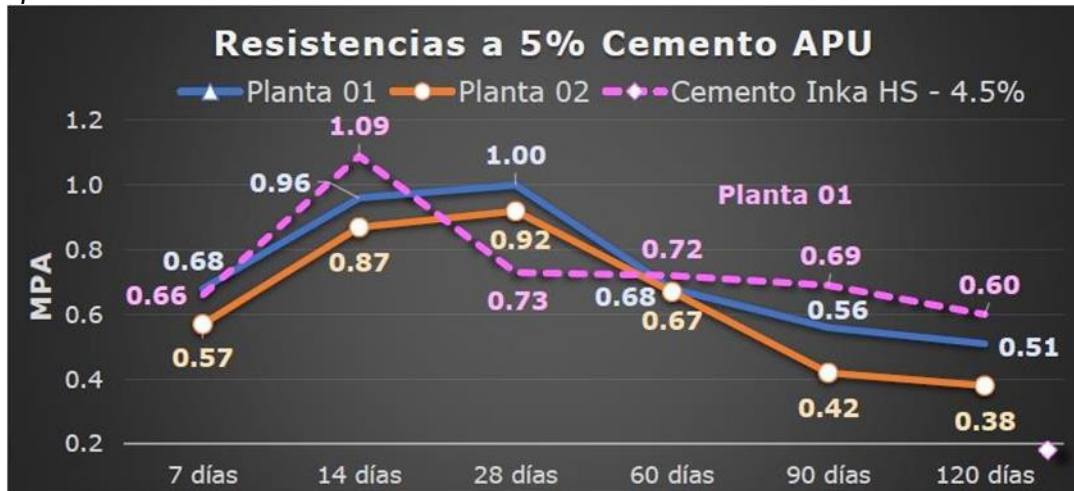
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de resultados

Evaluando las pruebas industriales 1 hasta 8 producidas en la Planta 1 y 2, ejecutadas en interior mina como en superficie. Y comparándolos con los resultados históricos que tenemos.

Figura 45

Comparación se resultados histórico 5.0% vs cemento Inka 4.5%

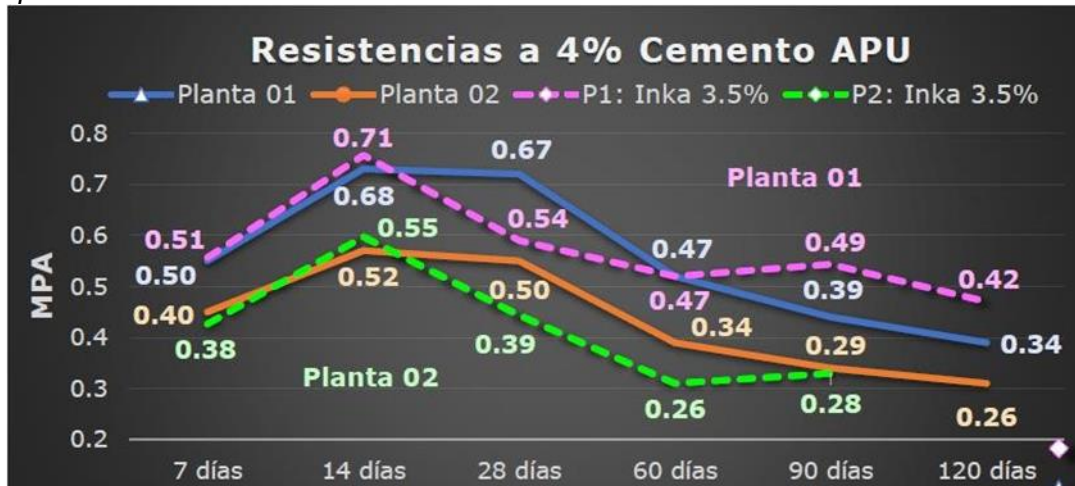


Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se concluye que el cemento Inka 4.5% obtiene resultados superiores al cemento Unacem 5.0%. Lo que representa una reducción de 10% en consumo de cemento.

Figura 46

Comparación se resultados histórico 4.0% vs cemento Inka 3.5%



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se concluye que el cemento Inka 3.5% obtiene resultados similares al cemento Unacem 4.0% en ambas plantas de producción. Lo que representa una reducción de 12.5% en consumo de cemento.

Figura 47

Comparación se resultados histórico 3.0% vs cemento Inka 2.7%



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se concluye que el cemento Inka 2.7% obtiene resultados menores, pero aceptables, al cemento Unacem 4.0%. Lo que representa una reducción de 10% en consumo de cemento. Generalmente los rellenos de baja concentración de cemento son bombeados a tajos terciarios, por lo que no requiere una resistencia a la compresión elevada.

Evaluando las pruebas industriales 9 y 10 que se produjeron en la Planta 2, se comparó los resultados de resistencia con la composición química del relave. Donde se evidencia una variabilidad del contenido de Fe y S del relave para un mismo tajo.

Tabla 13

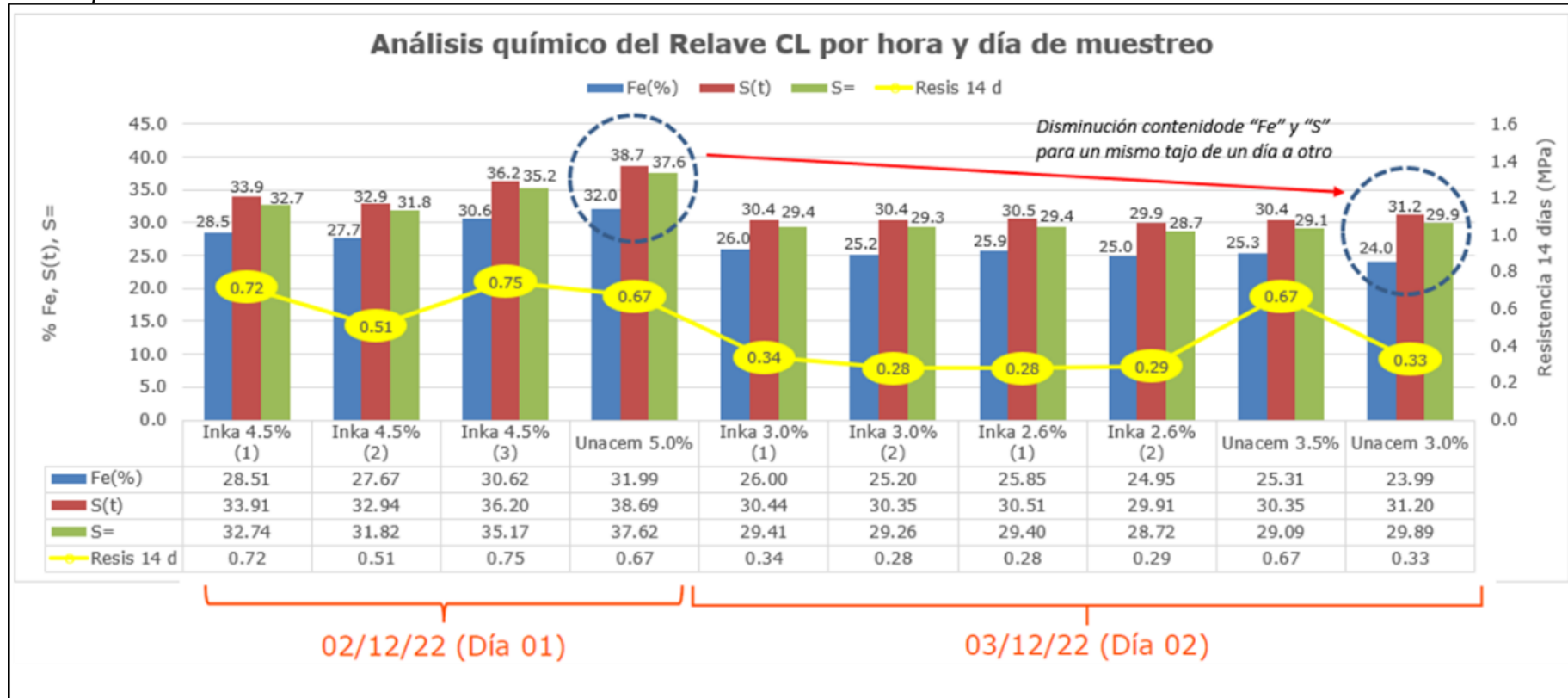
Análisis químico de relave – pruebas industriales 9 y 10

Código de muestra	Fe %	S(t) %	S %	SO ₄ %	Resistencia a 14 días MPa
Inka 4.5% (1)	28.51	33.91	32.74	1.17	0.72
Inka 4.5% (2)	27.67	32.94	31.82	1.11	0.51
Inka 4.5% (3)	30.62	36.20	35.17	1.03	0.75
Unacem 5.0%	31.99	38.69	37.62	1.07	0.67
Inka 3.0% (1)	26.00	30.44	29.41	1.03	0.34
Inka 3.0% (2)	25.20	30.35	29.26	1.10	0.28
Inka 2.6% (1)	25.85	30.51	29.40	1.11	0.28
Inka 2.6% (2)	24.95	29.91	28.72	1.19	0.29
Unacem 3.5%	25.31	30.35	29.09	1.25	0.67
Unacem 3.0%	23.99	31.20	29.89	1.31	0.33

Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Análisis químico del relave vs resistencia a 14 días



Fuente: Elaboración propia

4.2 Evaluación económica

Ubicación de la planta: El nuevo proveedor de cemento tiene su planta de producción ubicada en Pisco. Esta ubicación permite que el flujo de tiempos y costo logístico sea menor. Ver figura 49.

Tipo de cemento: Utilización de otro tipo de cemento (HS) con especificaciones más adecuadas para relave CL que generen un consumo menor y en consecuencia un beneficio económico.

Figura 49

Ubicación de planta de nuevo proveedor



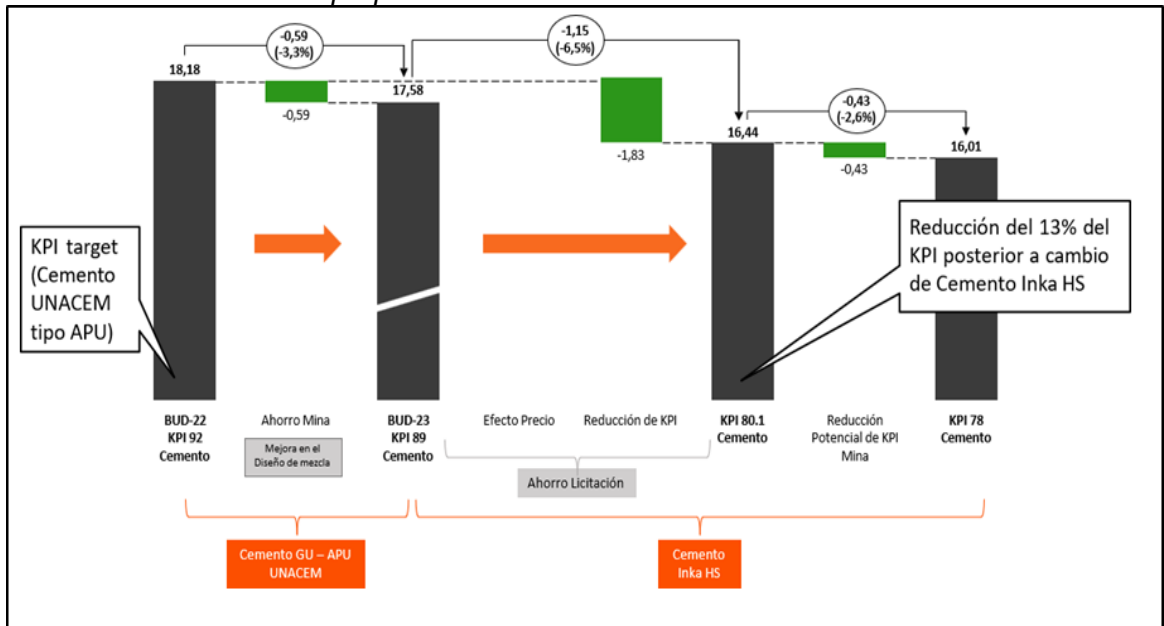
Fuente: Google Maps

Presupuesto KPI 89:

- Volumen anual: 146kT
- Precio unitario: 120.34 USD
- Spend anual: 17.58 MM USD

Figura 50

Análisis económico de la propuesta



Fuente: Elaboración propia

Figura 51

Ahorro (MM USD) por consumo (%) y tipo de cemento

		% CEMENTO INKA HS															
		3.76	3.69	3.62	3.56	3.42	3.35	3.28	3.21	3.15	3.08	3.01	2.99	2.94	2.87	2.80	2.74
% CEMENTO UNACEM T.M.	3.76	-0.73	-0.37	-0.02	0.34	0.69	1.06	1.06	1.79	2.15	2.52	2.89	2.98	3.25	3.62	3.98	4.35
	3.69	-1.08	-0.72	-0.36	0.00	0.35	0.71	0.71	1.44	1.81	2.18	2.54	2.63	2.91	3.27	3.64	4.00
	3.62	-1.42	-1.06	-0.70	-0.35	0.00	0.37	0.37	1.10	1.47	1.83	2.20	2.29	2.56	2.93	3.29	3.66
	3.56	-1.76	-1.41	-1.05	-0.69	-0.34	0.02	0.02	0.76	1.12	1.49	1.85	1.94	2.22	2.58	2.95	3.31
	3.49	-2.11	-1.75	-1.39	-1.04	-0.69	-0.32	-0.32	0.41	0.78	1.14	1.51	1.60	1.87	2.24	2.60	2.97
	3.42	-2.45	-2.10	-1.74	-1.39	-1.04	-0.32	-0.32	0.41	0.78	1.14	1.51	1.60	1.87	2.24	2.60	2.97
	3.42	-2.45	-2.10	-1.74	-1.39	-1.04	-0.32	-0.32	0.41	0.78	1.14	1.51	1.60	1.87	2.24	2.60	2.97
	3.35	-2.80	-2.44	-2.08	-1.73	-1.37	-1.01	-1.01	-0.28	0.09	0.45	0.82	0.91	1.18	1.55	1.91	2.28
	3.28	-3.14	-2.79	-2.43	-2.07	-1.72	-1.35	-1.35	-0.62	-0.26	0.11	0.47	0.56	0.84	1.20	1.57	1.93
	3.21	-3.49	-3.13	-2.77	-2.41	-2.06	-1.70	-1.70	-0.97	-0.60	-0.24	0.13	0.22	0.49	0.86	1.22	1.59
	3.15	-3.83	-3.48	-3.12	-2.76	-2.41	-2.04	-2.04	-1.31	-0.95	-0.58	-0.22	-0.13	0.15	0.51	0.88	1.24
	3.08	-4.18	-3.82	-3.46	-3.10	-2.75	-2.39	-2.39	-1.66	-1.29	-0.93	-0.56	-0.47	-0.20	0.17	0.53	0.90

Fuente: Elaboración propia

3.42% de consumo de cemento promedio

- Nivel I del Tajo a un consumo de 5.0% representa 30% del Cemento consumido por relleno.
- Nivel II del Tajo a un consumo de 3.0% representa 70% del Cemento consumido por relleno.
- Consumo base de cemento anual de 146kT al 2023.

Tabla 14*Condiciones comerciales*

Proveedor	Duración contrato	Condición de pago	Actualización precios	Ubicación planta	Atención
Cemento Inka	5 años	90 días	Cada 6 meses	Pisco / CJM	Todos los días
Unacem	1 año	60 días	Cada 3 meses	Atocongo	No domingos ni feriados

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15*Evaluación económica*

Descripción del ítem detallada	Volumen anual (T)	Insumo cemento Precio unitario	Transporte Flete unitario	Precio total (USD/T)	Presupuesto anual (USD)	Variación de P. anual (%)	Diferencia presupuesto (USD)
Cementos Inka	132k	USD	USD	USD	USD 16.4	- 6.5%	-USD 1.1
cemento tipo HS a granel		106.70	18.28	124.98	MM		MM
Unacem cemento tipo APU a granel	146k	USD	USD	USD	USD 17.8	+1.5%	+USD 0.2
		99.41	22.70	122.11	MM		MM

Fuente: Elaboración propia

- Propuesta con disminución del 10% (KPI = 80.1 kg/m³) del consumo de cemento con el proveedor C. Inka.
- Iniciativa a futuro, pruebas industriales para obtener una reducción del 12.5% (KPI = 78 kg/m³) con C. Inka.
- Ahorro tentativo: USD 1.6MM

Algunas consecuencias del cambio de proveedor.

- Mayor cobertura de stocks de seguridad, reducción del consumo (10%).
- Mayor eficiencia en la planificación y asignación de recursos de transporte.
- Reducción en el costo de cemento puesto en Cerro Lindo.
- Mayor poder de negociación y mejor relacionamiento con el proveedor (aumento de plazo de pagos +30 días).
- Mejora en el proceso de facturación.
- Menor cantidad de vehículos que transitan hacia mina (reducción de viajes de bombonas anual de 360 unidades).

- Menores impactos ambientales (reducción de emisiones CO2 equivalente de aproximadamente 1200t).
- Receptividad ante nuevas iniciativas de innovación en la unidad minera.
- Garantizar el nivel de resistencia (<30 días)..

Conclusiones

Las pruebas de caracterización mineralógica de relave concluyen que se va tener una menor presencia de sulfuros conforme va avanzado el tiempo de vida de la Unidad Minera.

El tipo de Cemento INKA utilizado en el proceso de relleno en pasta presenta una mayor performance de resistencias comparado con el tipo de cemento empleado anteriormente -10% de consumo.

El uso de ligantes a base de escoria como el Inka 42.5 Low Heat (LH) Resistente a Sulfatos (RS). Los aglutinantes de alto contenido de sulfato (HS) también ayudarán a mitigar cualquier ataque de sulfuros de hierro y la degradación del relleno en pasta.

La reducción en el consumo de cemento genera beneficios económicos de aproximadamente USD 1.1 MM al año, al disminuir costos operativos y logísticos, además de impactos ambientales positivos, como la reducción de emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento de 1200 t anuales.

La sedimentación de sólidos y la segregación de la pasta siempre serán un problema, pero se espera que la reducción de la pirita en los minerales futuros ayude a aliviar estos problemas.

Recomendaciones

Seguir realizando pruebas con aditivos que mejoren la bombeabilidad de la pasta hacia zonas alejadas de interior min.

Evaluar la implementación de una estación de re bombeo en interior mina, las cuales permita llevar el relleno en pasta a longitudes mayores a 1 km sin perder la calidad de la misma.

Implementar muestras de toma para cálculos de resistencias y densidad en el punto de descarga de interior mina.

Generar una auditoría de equipos que se tiene en el Laboratorio de Relleno en Pasta.

Referencias bibliográficas

- Ampuero J. et al (2015). *Propuesta de aplicación del método de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento*.
- Belem, T. et al (2008). *Design and application of underground mine paste backfill technology*. Geotechnical and Geological Engineering.
- Hassani, F. P. et al (2007). *Paste backfill geomechanics for underground hard rock mining*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Jones, P. et al (2020). *Industrial mixing technologies: Applications and innovations*. Journal of Process Engineering.
- Lain, C. (2015). *Estudio de las distribuciones tensionales y de las resistencias de los rellenos de pasta de la mina subterránea de aguas teñidas (Huelva)*.
- Li, X. et al (2013). *Environmental benefits of using cemented paste backfill*. Journal of Cleaner Production.
- Martínez, J. et al (2019). *Advances in mixing equipment for industrial applications*. Chemical Engineering Transactions.
- Putzmeister. (2021). *Innovative pumping solutions for construction and mining industries*. Putzmeister Technical Documentation.
- Sánchez, M. et al (2018). *Innovaciones en filtración de lodos industriales*. Journal of Environmental Engineering.
- Smith, D. et al (2018). *High-efficiency mixing systems for manufacturing*. Journal of Industrial Engineering.
- Takahashi, K. et al (2019). *Advances in thickener technology for mineral processing*. Journal of Mining Engineering.
- Villegas, L. (2006). *Relleno en pasta utilizado en la mina Iscaycruz*.
- Vives, A. (2015). *Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado*.
- Yilmaz, E. et al (2014). *Strength and deformation behavior of cemented paste backfill*.

Construction and Building Materials.

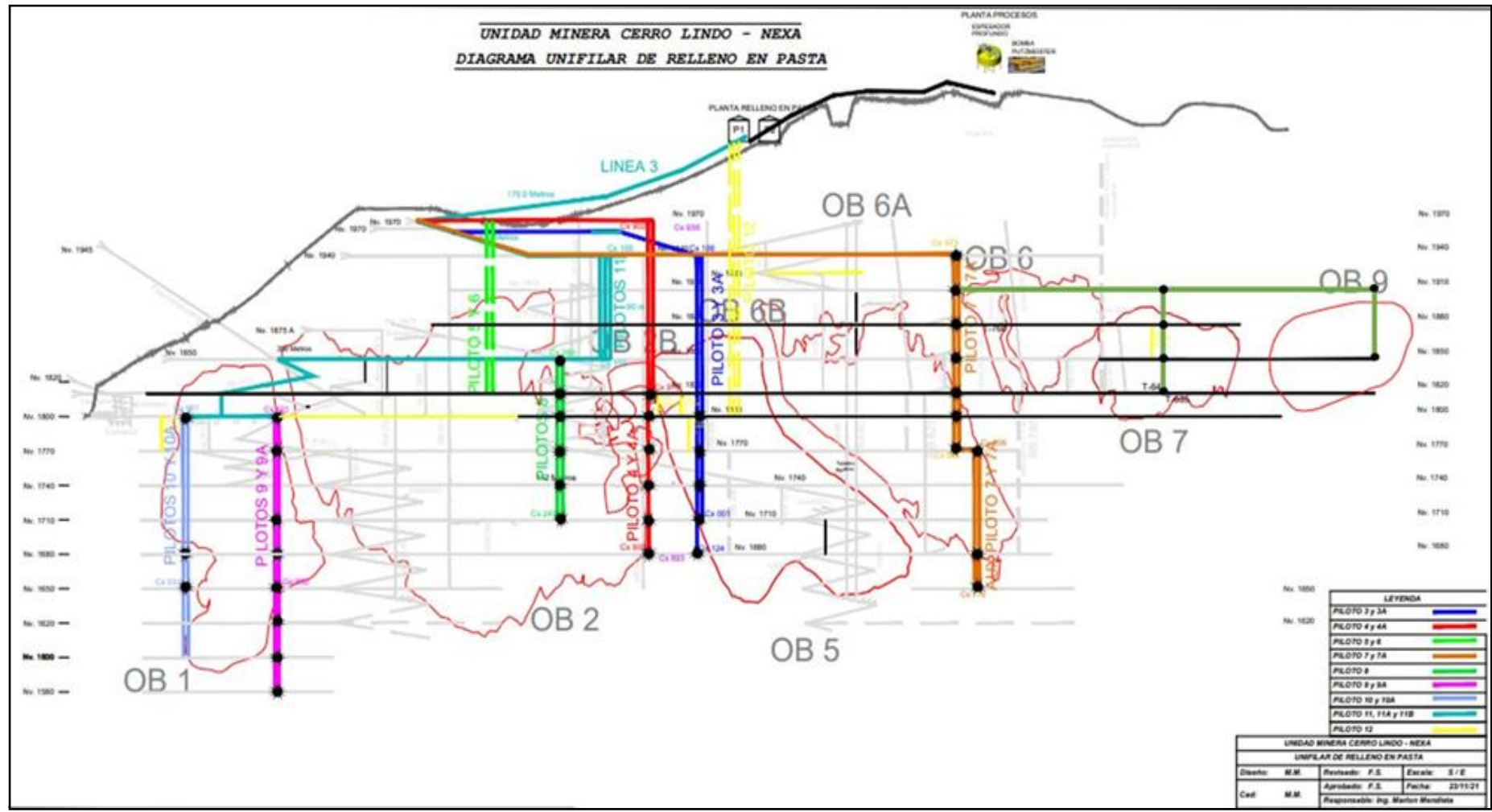
Zhang, H. et al (2021). *Sedimentation dynamics in industrial thickeners: A review*. Chemical Engineering Transactions.

Anexos

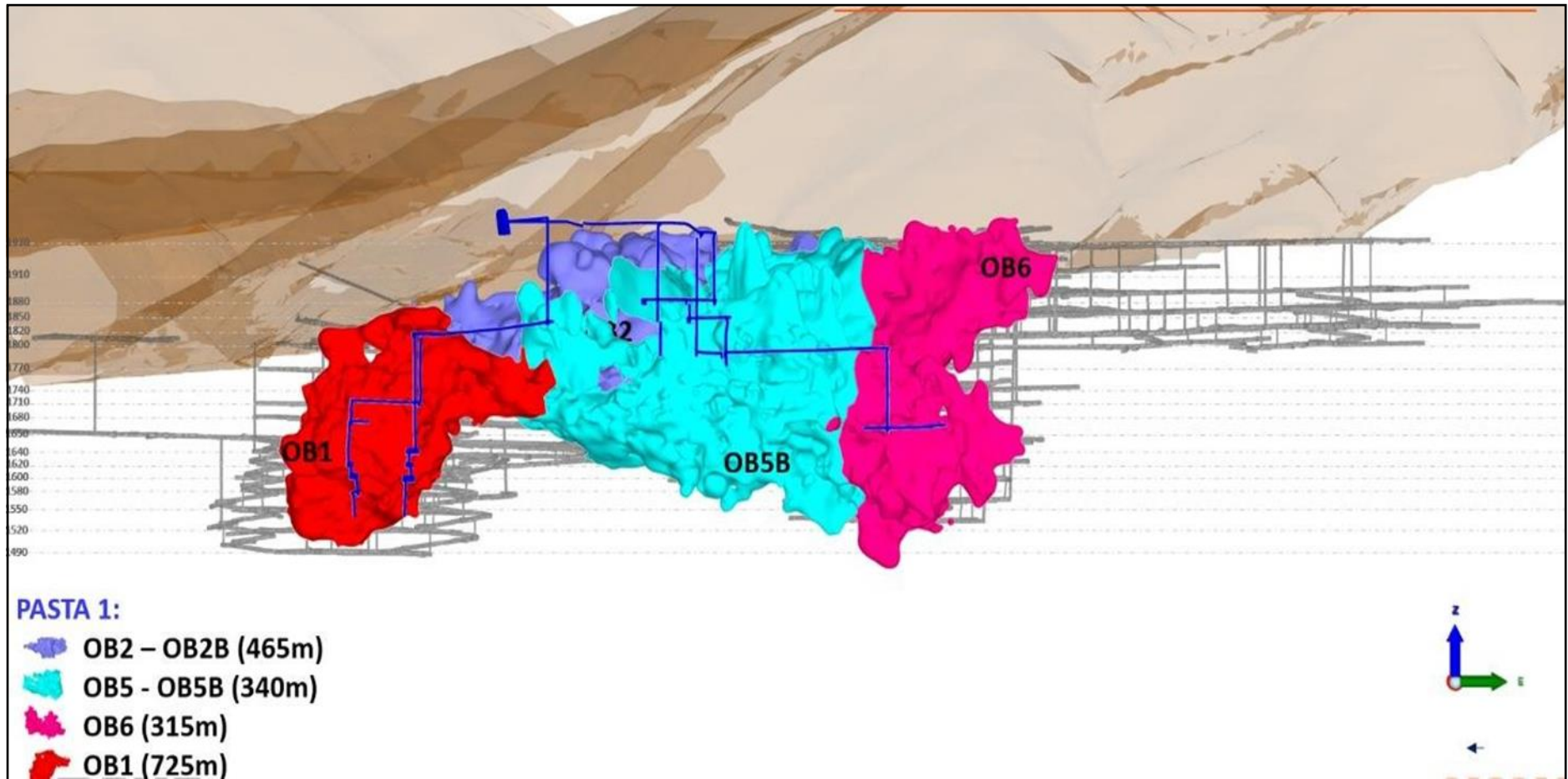
Pág.

Anexo 1: Diagrama unifilar de relleno	1
Anexo 2: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01.....	2
Anexo 3: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01 y 02	3
Anexo 4: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01, 02 y 03.....	4
Anexo 5: Ficha técnica cemento Inka	5

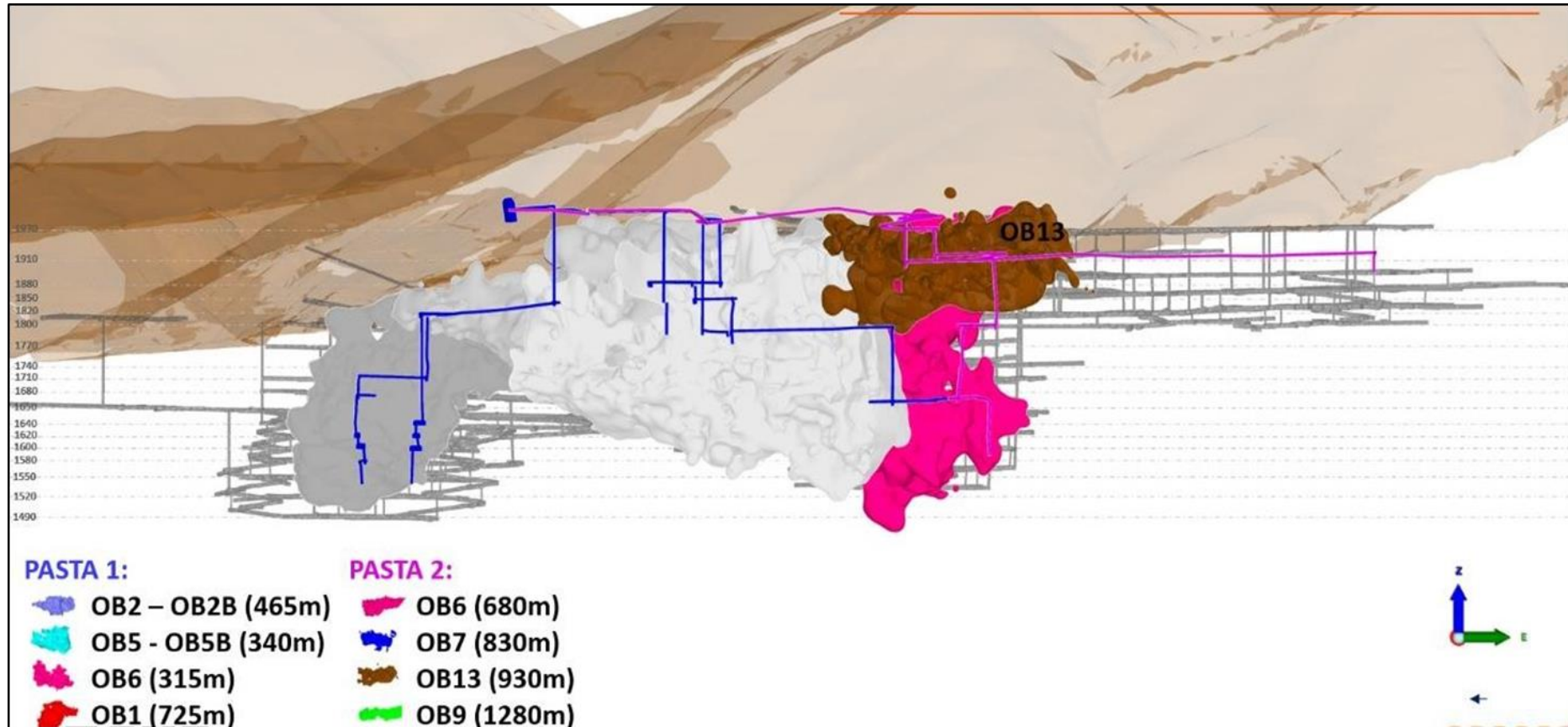
Anexo 1: Diagrama unifilar de relleno



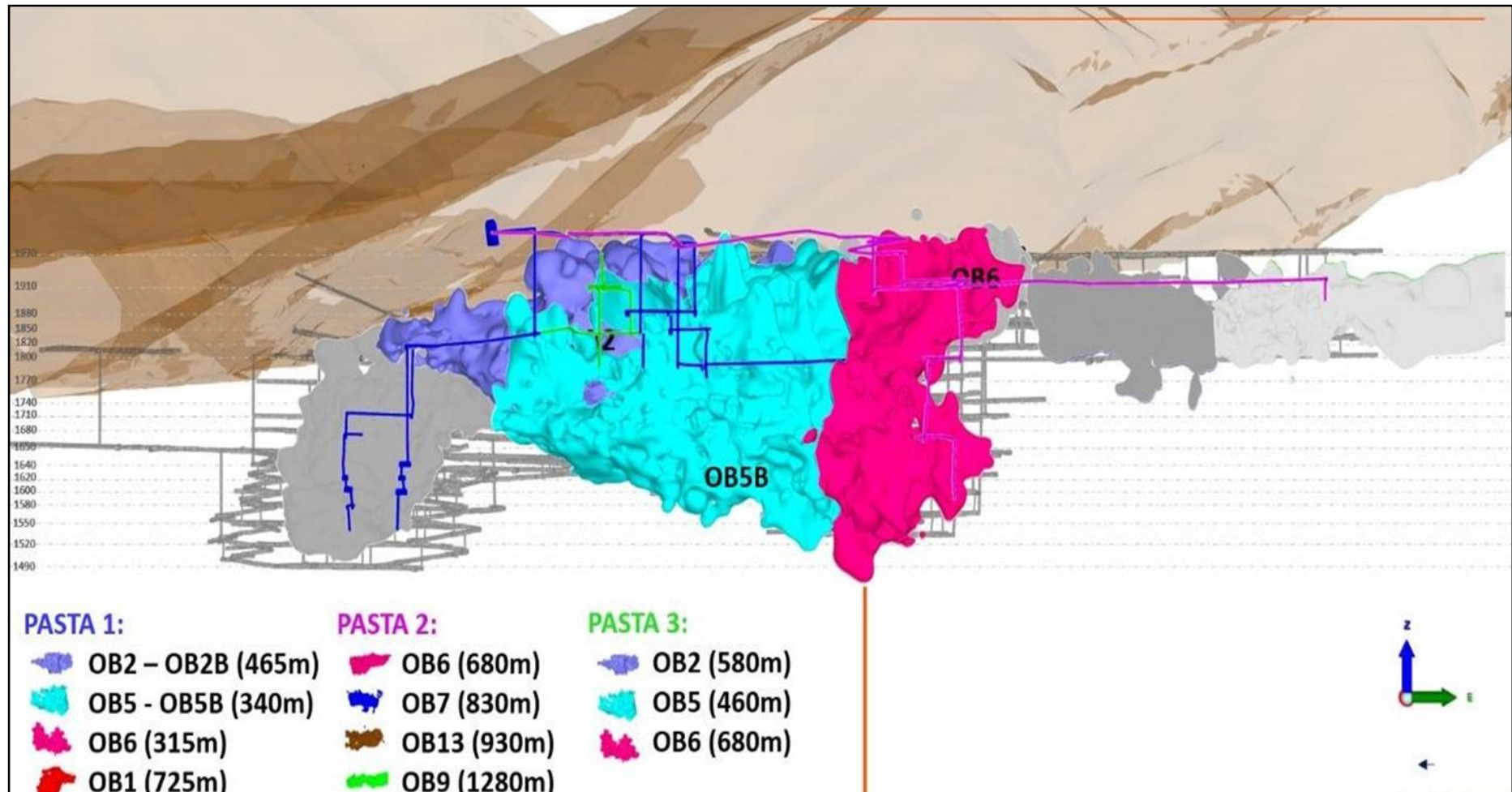
Anexo 2: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01



Anexo 3: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01 y 02



Anexo 4: Esquema Actual de Relleno en Pasta 01, 02 y 03.



> FICHA TÉCNICA

CEMENTO ANTI SALITRE

CON ADICIONES
ACTIVAS +LH+R

TIPO HS





> CEMENTO DE USO GENERAL

Cuenta con ventajas y propiedades únicas para el uso en la industria, minería, infraestructura vial, construcción de viviendas, edificios, obras de concreto estructural, obras hidráulicas y aquellas que estén expuestas a suelos húmedos salitrosos, al agua de mar y brisa marina.

> CARACTERÍSTICAS

El Cemento INKA Anti Salitre posee bajo calor de hidratación y alta resistencia a los sulfatos, así como baja reactividad con agregados álcali-reactivos. Estas características resultan ideales para cualquier construcción en zonas húmedas salitrosas y expuestas al agua de mar. Por ello, cumplen con las normas técnicas NTP 334.082 y la ASTM C-1157.

Sus adiciones activas, complementadas con una molienda extrafina, disminuyen la posibilidad del ingreso de cualquier agente agresor. Asimismo, protegen los aceros de refuerzo contra la acción de los cloruros, lo que garantiza una mayor durabilidad de la obra.

> PROPIEDADES

- SUPER RESISTENTE AL SALITRE
- MAYOR IMPERMEABILIDAD Y DURABILIDAD
- MAYOR RESISTENCIA EN EL TIEMPO
- BAJO CALOR DE HIDRATACIÓN
- RESISTENTE A LA REACCIÓN ÁLCALI- SÍLICE



PÍDELO EN LA RED INKA
☎ (01)5000600 Anx.125
☎ 946528340
📍 Sub lote 2C Cajamarquilla
Lurigancho/Chosica, Lima.

CUIDAMOS NUESTRO
MEDIO AMBIENTE



Conforme a normas técnicas:
NTP 334.082 / ASTM C-1157

 /CementoInkaPeru

cementosinka.com.pe