

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
**Evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del
shotcrete a interior mina**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Henry Mario Grandez Llanca

 [0009-0000-6438-4865](https://orcid.org/0009-0000-6438-4865)

Asesor

MSc. Adolfo Jesús Chávez Valdivia

 [0000-0003-0625-1495](https://orcid.org/0000-0003-0625-1495)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Grandez Llanca[1]
Referencia/Reference	[1] H. Grandez Lanca, " <i>Evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Grandez, 2024)
Referencia/Reference	Grandez, H. (2024). <i>Evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres Genaro y María, a mis hermanos, a mi esposa
Jackeline y a mi hija Catalina que cada día guían mi camino
para convertirme en una mejor persona*

Agradecimientos

A mi familia, a la Universidad Nacional de Ingeniería, a mis profesores y a todas aquellas personas que contribuyeron para poder realizar el presente trabajo.

Resumen

El objetivo del presente proyecto de investigación es realizar una evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte de transporte del shotcrete a interior mina; disminuyendo tiempos en el traslado de la mezcla a las labores de exploración, preparación, desarrollo y explotación, mejorar el proceso de sostenimiento y garantizar la seguridad al personal y equipos que transiten en interior mina.

En la industria minería, el factor tiempo es uno de los componentes más relevantes, y diariamente es afectado por las demoras operativas que se presentan en la fabricación del shotcrete en la planta de superficie, en el traslado por falla de los equipos mixers, la distancia existente y el tránsito de equipos hasta la labor solicitada, y ante la necesidad constante de mejorar los procesos y la reducción de costos para que la operación se realice de manera más eficiente se presentó el siguiente proyecto de investigación.

Los cuellos de botella en la operación son las demoras operativas en el sostenimiento que ocasionan desciclado en las operaciones unitarias del proceso productivo y finalmente no se logre cumplir con el programa establecido.

Palabras claves — Evaluación técnico-económica, transporte del shotcrete, planta de shotcrete

Abstract

The objective of this research project is to carry out a technical-economic evaluation to improve the transport process of shotcrete inside the mine; reducing times in the transfer of the mixture to the exploration, preparation, development and exploitation tasks, improving the support process and guaranteeing the safety of the personnel and equipment that travel inside the mine.

In the mining industry, the time factor is one of the most relevant components, and it is daily affected by the operational delays that occur in the manufacture of shotcrete in the surface plant, in the transfer due to failure of the mixing equipment, the distance existing and the transit of equipment to the requested work, and in view of the constant need to improve processes and reduce costs so that the operation is carried out more efficiently, the following research project was presented.

The bottlenecks in the operation are the operative delays in the support that cause de-cycling in the unitary operations of the productive process and finally the established program is not fulfilled.

Keywords — Technical-economic evaluation, shotcrete transportation, shotcrete plant

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Planteamiento del Problema de Investigación.....	1
1.2.1 Descripción del problema	1
1.2.2 Formulación del Problema.....	3
1.3 Objetivo de la Investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.4 Antecedentes de la de la Investigación	4
1.4.1 Antecedentes Internacionales	4
1.4.2 Antecedentes Nacionales.....	9
1.4.3 Antecedentes locales	10
1.5 Hipótesis de la Investigación	12
1.5.1 Hipótesis	12
1.5.2 Variables	12
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	13
2.1 Marco teórico	13
2.1.1 Métodos de aplicación de concreto lanzado.....	13
2.1.2 Proceso productivo de shotcrete	15
2.1.3 Plantas de hormigón	15
2.1.4 Criterios de evaluación económica.....	16
2.2 Marco conceptual.....	18
2.2.1 Evaluación:	18
2.2.2 Mixer:	18

2.2.3 Transporte:.....	18
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	19
3.1 Tipo y Diseño de la Investigación.....	19
3.1.1 Tipo de la investigación.....	19
3.1.2 Diseño de la investigación.....	19
3.2 Unidad de Análisis	19
3.3 Matriz de Consistencia.....	20
3.4 Recolección de datos.....	22
3.4.1 Transporte actual del shotcrete	22
3.4.2 Tiempo de transporte del shotcrete.....	23
3.5 Procesamiento de la información	29
3.5.1 Cumplimiento del programa de sostenimiento con shotcrete.....	29
3.6 Análisis de la información.....	30
3.6.1 Proceso productivo del Shotcrete.....	30
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	33
4.1 Evaluación de alternativas.....	34
4.1.1 Alternativa A: planta de concreto en superficie y transporte en mixers.....	34
4.1.2 Alternativa B: planta de concreto en interior mina y transporte en mixers.....	36
4.1.3 Alternativa C: planta de concreto en superficie y transporte por tuberías	39
4.2 Análisis Económico	41
Conclusiones	44
Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas.....	47
Anexos	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Shotcrete proyectado por vía seca vs vía húmeda.....	8
Tabla 2 : Dosificación para 1 m3 de shotcrete	9
Tabla 3 : Matriz de consistencia.....	21
Tabla 4 : Suministro de shotcrete.....	22
Tabla 5 : Tiempo de transporte del shotcrete	23
Tabla 6 : Tiempo de transporte del shotcrete.....	24
Tabla 7 : Tiempo de transporte del shotcrete.....	25
Tabla 8 : Demoras operativas en el transporte del shotcrete	26
Tabla 9 : Demoras operativas en el transporte del shotcrete	27
Tabla 10: Demoras operativas en el transporte del shotcrete	28
Tabla 11: Cumplimiento del programa de sostenimiento con shotcrete.	30
Tabla 12: Costos de inversion – alternativa A	34
Tabla 13: Costos operativos – alternativa A.....	35
Tabla 14: Costos de inversion – alternativa B	37
Tabla 15: Costos operativos – alternativa B.....	37
Tabla 16: Costos de inversion – alternativa C.....	40
Tabla 17: Costos operativos – alternativa C.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ciclo de transporte del shotcrete a interior mina	2
Figura 2 : Transporte del shotcrete a interior mina	3
Figura 3 : Circuito cerrado del sistema de tuberías en la mina de diamantes Cullinan	6
Figura 4 : Etapas de deflexión de los soportes.....	7
Figura 5 : Evaluación económica de un proyecto.....	11
Figura 6 : Diagrama de subprocesos para la elaboración de shotcrete	12
Figura 7 : Proceso productivo del shotcrete	15
Figura 8 : Ubicación general del campamento de la UEA San Cristobal	20
Figura 9 : Demoras operativas en el transporte del shotcrete	27
Figura 10: Demoras operativas en el transporte del shotcrete	28
Figura 11: Demoras operativas en el transporte del shotcrete	29
Figura 12: Esquema de transporte del shotcrete.....	34
Figura 13: Esquema de transporte del shotcrete.....	36
Figura 14: Esquema de transporte del shotcrete.....	39
Figura 15: Análisis económico comparativo	42

Introducción

El presente trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos, los cuales se detallan a continuación:

El Capítulo I, titulado Parte introductoria del trabajo en el cual se detallan las Generalidades donde se describe el alcance del trabajo de investigación, el problema a solucionar y la finalidad de la investigación; la Descripción del problema de investigación, donde se detalla la problemática de una empresa minera subterránea, se describen las causas de la problemática y las consecuencias que provocan. Se plantea el problema a solucionar en la investigación en forma de pregunta; el Objetivo de la investigación, en el cual se detalla la finalidad del trabajo de Investigación; la Hipótesis, donde plantea una adecuada evaluación técnico-económica que influirá en mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina; los Antecedentes investigativos, donde se detalla la revisión de antecedentes acerca del transporte del shotcrete a interior mina utilizando equipos sobre ruedas y tuberías, se revisó antecedentes internacionales, nacionales y locales.

Asimismo, en este capítulo también se señala la hipótesis de la investigación y las variables planteadas.

En el Capítulo II, titulado Marco Teórico y Marco Conceptual se detalla los métodos de aplicación del shotcrete, el proceso productivo del shotcrete y la evaluación técnico-económica de un proyecto de inversión.

En este capítulo también se detalla el tipo y diseño de la investigación, unidad de análisis y la matriz de consistencia.

En el Capítulo III, titulado Desarrollo del trabajo de investigación, se detalla la recolección de datos, el procesamiento y el análisis de la información.

Finalmente, el capítulo IV, titulado Análisis y discusión de Resultados, se detalla la evaluación económica de las tres alternativas para el transporte del shotcrete a interior mina.

Señalándose que todos los capítulos están debidamente engarzados a fin de brindar una información detallada del presente trabajo de investigación titulado: Evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En las empresas mineras la utilización del shotcrete para el sostenimiento de sus labores mineras es importante para garantizar la seguridad de los trabajadores, equipos y recursos que se utilizan en la operación.

Para sostenimiento de las labores mineras se utiliza sostenimiento pasivo o sostenimiento activo; el sostenimiento pasivo, es el de “soporte”, este tipo de sostenimiento no ejerce esfuerzos sobre el macizo rocoso, desarrollando su capacidad resistente a medida que la roca se deforma; mientras que el sostenimiento activo, o de “refuerzo”, si ejerce esfuerzos predeterminados al macizo rocoso, asimilando presiones ocasionadas por el minado.

En toda explotación minera, el sostenimiento de las labores es un trabajo adicional de alto costo que reduce la velocidad de avance y/o producción pero que a la vez es un proceso esencial para proteger de accidentes al personal y al equipo.

1.2 Planteamiento del Problema de Investigación

1.2.1 Descripción del problema

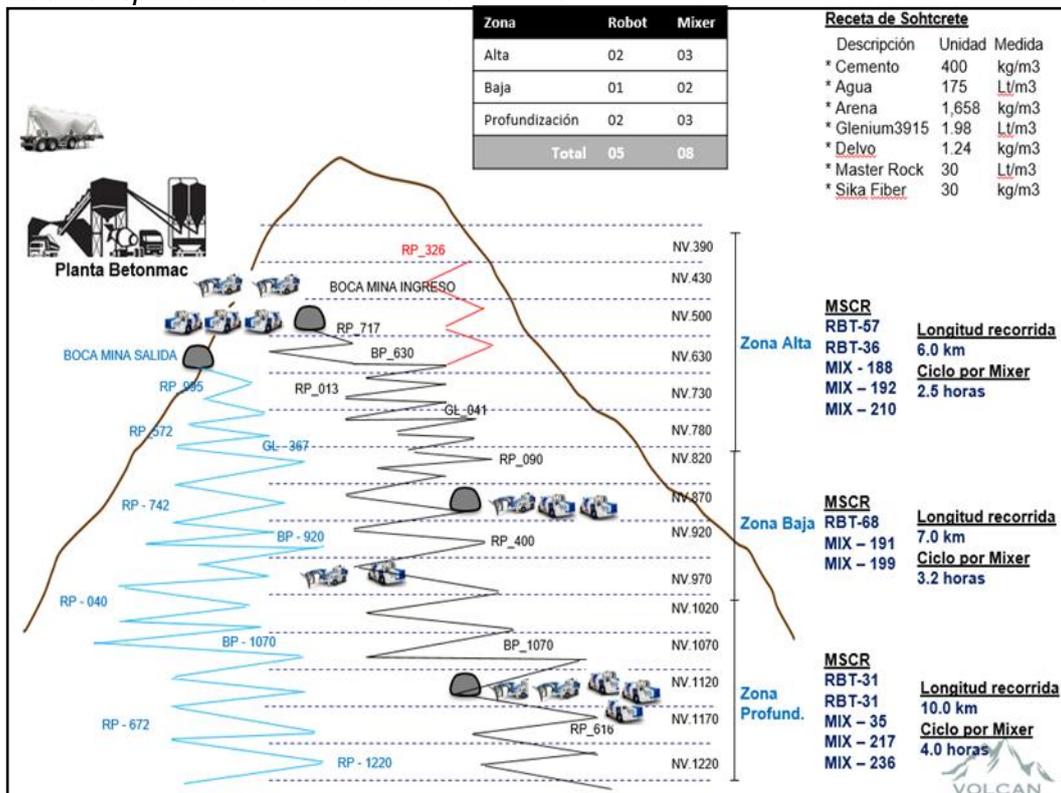
Actualmente la exploración, desarrollo, preparación y explotación de las minas se realizan en estructuras por debajo de los 750 m de encampane, con el objetivo de prolongar la vida de la mina y verificar los recursos y reservas en la estructura mineralizada.

Por la profundidad de las operaciones mineras, el ciclo de traslado de la mezcla de superficie hasta interior mina; es de 240 minutos que es el tiempo máximo de exposición de la mezcla antes de ser aplicada; esta problemática actual permite realizar una evaluación técnico-económica del proceso de transporte del shotcrete a interior mina.

En la Figura 1 se muestra el ciclo de transporte del shotcrete actual desde una planta de shotcrete en superficie hasta las labores en interior mina.

Figura 1

Ciclo de transporte del shotcrete a interior mina



Fuente: Compañía Minera Volcan – UEA San Cristobal (2018) “Ciclo de transporte del shotcrete a interior mina”.

También, las plantas de shotcrete actualmente presentan fallas mecánicas propios por el tiempo de vida útil que presenta > 8 años y cuya necesidad de mantenimiento supera la inversión de una nueva planta.

Por la distancia existente entre las labores desde la superficie a interior mina, se requiere 8 equipos de transporte del shotcrete (mixer) generando mayor tránsito de equipos en la vía y mayor emisión de gases producto de los equipos.

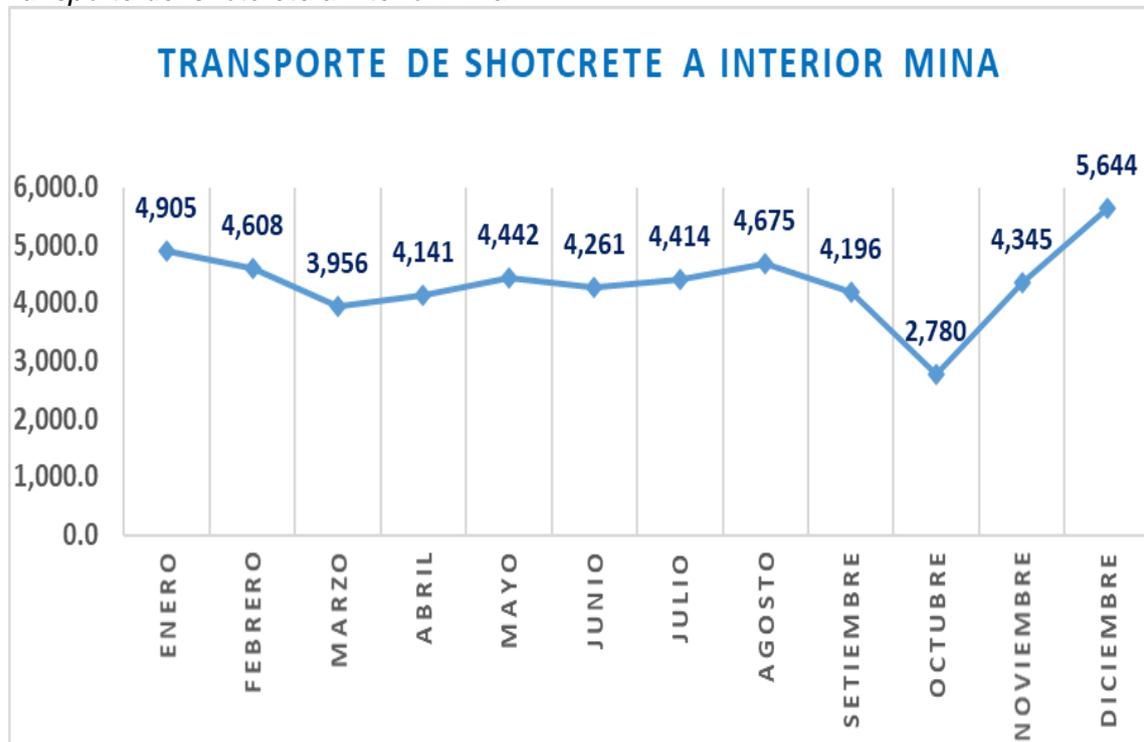
La falla mecánica de estos equipos mixers en una vía principal generaría una parada de las operaciones de extracción de mineral y el abastecimiento a planta sería limitado.

Para cumplir con los objetivos programados del mes, es necesario que se transporte 165 m3/día, y actualmente el máximo transporte del shotcrete es de 145 m3/día provocando incumplimientos en los avances y en la producción.

En la Figura 2 se muestra los m³ transportado del shotcrete actual desde una planta de shotcrete en superficie hasta las labores en interior mina.

Figura 2

Transporte del shotcrete a interior mina



Fuente: Compañía Minera Volcan – UEA San Cristobal (2018) “Transporte del shotcrete a interior mina”.

El incumplimiento en el abastecimiento del shotcrete a la operación, genera una inseguridad en la operación minera, con labores pendientes para el sostenimiento, condicionando al frente de trabajo en un peligro latente para el personal que labora en el frente, y también generando una demora en el ciclo de minado en la guardia.

1.2.2 Formulación del Problema

¿Qué alternativas técnico-económica podrían implementarse para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina?

1.3 Objetivo de la Investigación

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.

1.4 Antecedentes de la de la Investigación

1.4.1 Antecedentes Internacionales

Sagan, N (2017) “Cálculo y análisis de la viabilidad económica en proyectos de inversión”

El objetivo del autor fue definir la medición de la rentabilidad económica de un proyecto; pronosticar el comportamiento de todas las variables que condicionan su resultado. Por ello, lo común es explicar que lo que se evalúa es uno, quizás el más probable de los escenarios evaluados en un proyecto.

Sagan propone el cálculo de la rentabilidad de cada uno de los escenarios es una de las tareas más simples, fáciles y certeras del trabajo del evaluador. La determinación de la rentabilidad propiamente tal es un proceso mecánico que conduce siempre a un único resultado.

Conceptos básicos de matemáticas financieras: El autor menciona que la rentabilidad de un proyecto se puede medir de muchas formas distintas: en unidades monetarias, en porcentaje o en el tiempo que demora la recuperación de la inversión, entre otras. Todas ellas se basan en el concepto del valor tiempo del dinero, que considera que siempre existe un costo asociado a los recursos que se utilizan en el proyecto, ya sea de oportunidad, si existen otras posibilidades de uso del dinero, ya sea financiero, si se debe recurrir a un préstamo.

En otras palabras, \$1 de hoy vale más que \$1 a futuro, por cuanto el dólar recibido hoy puede invertirse inmediatamente para obtener una ganancia que el dólar recibido a futuro no logra obtener.

Por ejemplo, \$ 1,000 invertidos hoy al 10% anual, permiten obtener una ganancia de \$100 a recibir en un año más. Es decir, \$1,000 de hoy equivalen a \$1.100 de un más o, lo que es igual, \$1,100 de un año más equivalen a \$1,000 de hoy. Si los \$1,100 es invertido por un segundo año, se obtiene una ganancia de \$110, correspondiente a 10% del capital invertido. Es decir, \$ 1,000 de hoy equivalen a \$ 1,210 de dos años después.

En la Fórmula 1 se muestra la equivalencia entre un valor actual (VA) y un valor final o valor futuro (VF). Donde “i” es la tasa de rentabilidad exigida y “n” el número de períodos.

Fórmula 1

Equivalencia entre un valor actual y un valor futuro

$$VF = VA (1+i)^n$$

Fuente: Sagan, N (2017) “Cálculo y análisis de la viabilidad económica en proyectos de inversión”

Van Loggerenberg (2016) “The design of a concrete transport system on Cullinan Diamond Mine”

El objetivo del autor fue desarrollar un producto de concreto nuevo que minimice los costos cumpliendo criterios de rendimientos utilizados en la mina de diamantes Cullinan, la principal característica de este nuevo producto fue aumentar la resistencia utilizando fibras metálicas y sintéticas a 25, 45 y 60 MPa.

Van Loggerenberg menciona que el sistema de dosificación y entrega del nuevo producto de hormigón se transportará desde la superficie mediante tuberías suspendidas que entregan a una instalación de almacenamiento subterráneo desde donde se entregará el producto al área de trabajo mediante bombeo adicional.

El autor recomienda considerar lo siguiente para el proceso de diseño:

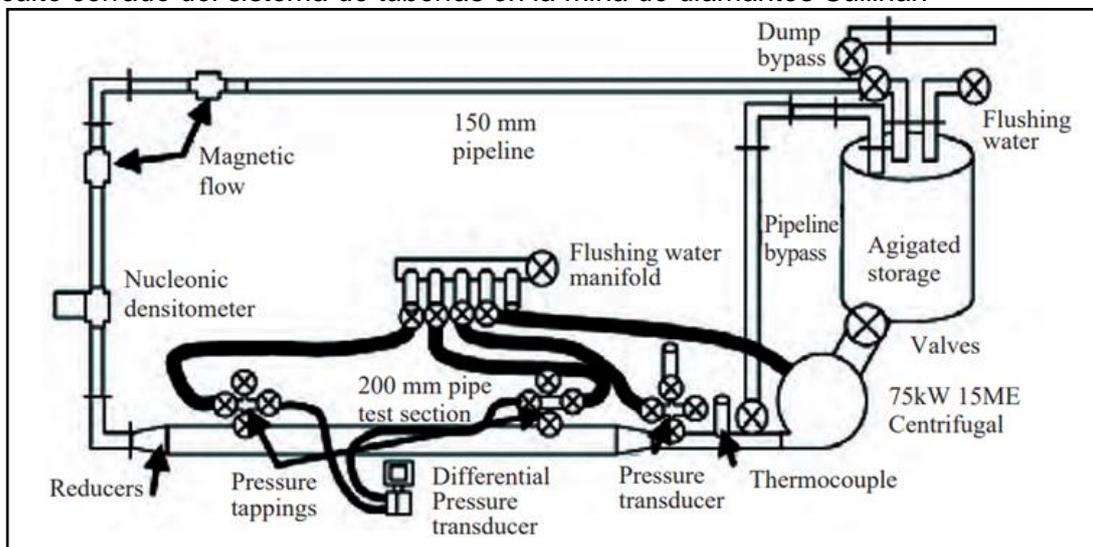
- Requisitos de ingeniería o mecánica de rocas para la hormigón proyectado y productos de hormigón, resistencia a la compresión, contracción, tasa de desgaste, durabilidad y absorción de energía
- Requisitos medioambientales del producto, es decir, consumo de agua.
- Diseños de mezclas de hormigón proyectado y hormigón, aditivos y tipo de agregados.
- Diseño de plantas de fabricación para producir los hormigón proyectado o productos de hormigón.
- Pruebas de resistencia de las tuberías.
- Diseño de las tuberías basado en fricción de pérdidas.

- Evaluaciones de riesgos y auditorías.
- Análisis de estrés de la tubería.
- Diagramas de disposición general y diagramas de flujo para planta y distribución.
- Presentación y finalización de la planta general y sistema de distribución.
- Planos de ingeniería de planta y distribución del sistema.

En la Figura 3 se muestra el circuito cerrado del sistema de tuberías diseñado en la Mina de diamantes Cullinan.

Figura 3

Circuito cerrado del sistema de tuberías en la mina de diamantes Cullinan



Fuente: Van Loggerenberg (2016) "The design of a concrete transport system on Cullinan Diamond Mine"

R. Bradley - D. Aronowitz (2018) "The design of a suspended concrete transport pipeline system"

El objetivo del autor fue formular un producto de hormigón proyectado de calidad para las ampliaciones de la mina de diamantes Cullinan, Bradley decidió transportar un innovador producto a una profundidad de 714 m a través de un sistema suspendido verticalmente de tuberías. El sistema de dosificación y entrega de productos del concreto sería operado desde la superficie en una planta dosificadora automatizada.

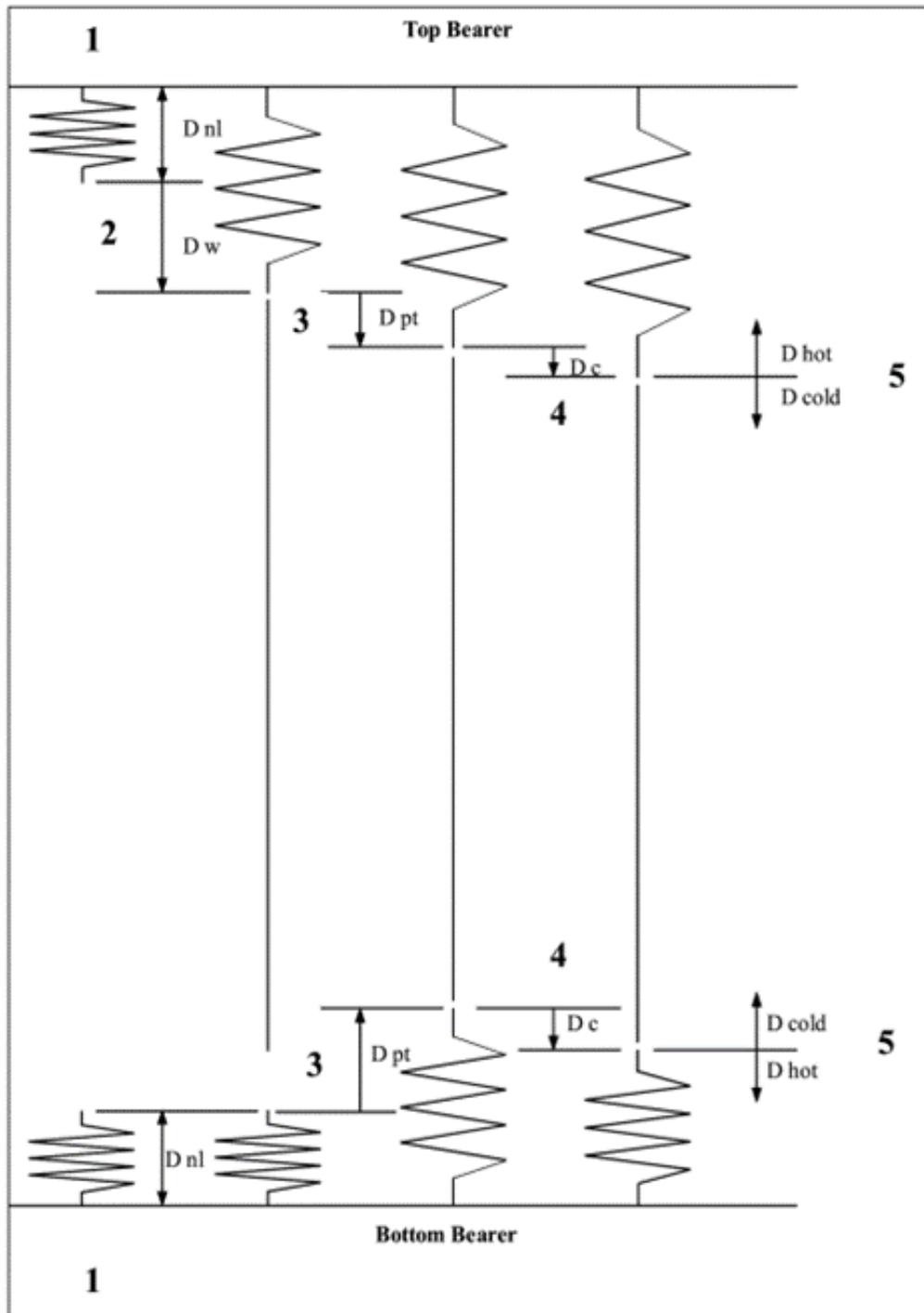
El autor, con el fin de garantizar la integridad y seguridad de las tuberías suspendidas, realizó un análisis de estrés de las tuberías para temperaturas extremas y asegurar que la tensión previa aplicada garantice que las columnas permanezcan en

tensión. Para garantizar un adecuado funcionamiento, se instalan soportes en la parte inferior y superior de la columna de tubería suspendida.

En la Figura 4 se muestra las diferentes etapas de deflexión de los soportes durante la instalación y funcionamiento del sistema.

Figura 4

Etapas de deflexión de los soportes



Fuente: R. Bradley - D. Aronowitz (2018) "The design of a suspended concrete transport pipeline system"

- La etapa 1 son los portadores no desviados (Dnl).
- La etapa 2 es la deflexión del soporte superior debido al peso vacío de la columna y los acoplamientos (Dw). Tenga en cuenta que el soporte inferior no está sujeto a cualquier carga sostenida en esta etapa.
- La etapa 3 es la desviación de los soportes superior e inferior debido a la pretensión (Dpt).
- La etapa 4 es la deflexión debida al peso del hormigón en la columna (Dc). El peso del hormigón se suponía que se repartía por igual entre la parte superior y portadores inferiores.
- La etapa 5 es la desviación de los soportes debido a la expansión o contracción térmica de la columna.

Erasmus, W.P. (2013) “Shotcrete lining of south deep shafts”

El objetivo W P Erasmus era utilizar un shotcrete proyectado reforzado con fibra de acero de "mezcla húmeda" como revestimiento permanente en pozos profundos, accediendo a arrecifes auríferos. Este shotcrete garantizará todos los aspectos de calidad enfrentando condiciones geológicas extremas. El autor realizó procedimientos alineados con la norma ISO 9001. En la Tabla 1 se muestra la comparación de shotcrete proyectado por método de vía seca versus vía húmeda.

Tabla 1

Shotcrete proyectado por vía seca vs vía húmeda

Método de vía seca	Método de vía húmeda
Ventajas	
Equipo relativamente económico	El rebote es 5% en paredes y 10% en promedio
Equipo relativamente pequeño y muy móvil.	Altamente mecanizado
Se utiliza en espacios confinados	Producción de 10 a 20 m3 por hora
Se utiliza para pequeños volúmenes	Mínimos niveles de polvo
	Bajo consumo de aire comprimido
Desventajas	
Rebote promedio del 30%. Elevada generación de polvo	Equipo relativamente elevado
Elevado consumo de aire comprimido	Equipo relativamente grande

Fuente: Erasmus, W.P. (2013) “Shotcrete lining of south deep shafts”

1.4.2 Antecedentes Nacionales

Barreda Gonzales, Rodrigo (2014) “Diseño de planta subterránea para optimizar y reducir costos en mina Chipmo Cia de Minas Buenaventura”

El objetivo del autor era explicar la correcta aplicación del shotcrete por vía seca en la unidad minera chipmo, con un diseño y construcción de una planta de shotcrete subterránea en interior mina para reducir costos y garantizar el sostenimiento de las labores de explotación, desarrollo y preparación de la mina.

En la siguiente Tabla 2 se muestra la dosificación para el shotcrete lanzado para 1 m³ de mezcla.

Tabla 2

Dosificación para 1 m³ de shotcrete

Características del Shotcrete para un metro cúbico	
Cemento	350 kg/m ³
Arena	1800 Kg
Aditivo	4 galones /m ³
Agua	200 litros
Relación agua/cemento	0.55
Resistencia a la compresión a 28 días	34 MPa
Resistencia a la tracción a 28 días	2.5 MPa
Resistencia a la adherencia a 2 horas	2 MPa
Fibra de acero	30 Kg/m ³
Shotcreteras	2 OCMER perteneciente a GyR
	3 OCMER perteneciente a GyM
	2 ALIVAS perteneciente a CIA
Cemento	Pórtland tipo 1
	42.5 Kg
Tipo Aditivo	SIGUNITL - 50AF
Calibradores	De tubo de PBC de 3 pulgadas
Superficie o área (S)	X
Potencia (P)	3 pulgadas = 0.076 m
Volumen (V)	1 m ³ de shotcrete
$S = V/P$	13.16 m ²
Rebote (20%)	2.63 m ²
1 m ³ de Shotcrete abarca aproximadamente 10.5 m ²	

Fuente: Barreda Gonzales, Rodrigo (2014) “Diseño de planta subterránea para optimizar y reducir costos en mina Chipmo Cia de Minas Buenaventura”

1.4.3 Antecedentes locales

Gala, Fernando (2020) “Formulación y evaluación de proyectos mineros”

El objetivo del autor es determinar la rentabilidad del proyecto, independientemente de las fuentes de financiamiento; en tal sentido, determina la rentabilidad (ganancia) para todos los que financiaron el proyecto. Para determinar la ganancia total del proyecto hay que realizar una evaluación económica del proyecto.

Gala realiza un análisis para la evaluación de proyectos mineros en marcha y expansión.

Evaluación de proyectos mineros en marcha:

- Los proyectos mineros de operaciones en marcha, suponen incrementar el valor actual de la empresa partiendo de una situación dada, que generalmente es mayor que cero.
- Para tal efecto es necesario determinar el incremento de valor por efecto de ejecutar el proyecto.
- La metodología de evaluación consiste en hallar tres flujos de caja. un flujo con proyecto, un flujo sin proyecto y un flujo diferencia.
- Son proyectos de operaciones en marcha, los proyectos de ampliación de capacidad, los proyectos operativos y los proyectos de reemplazo de equipos.

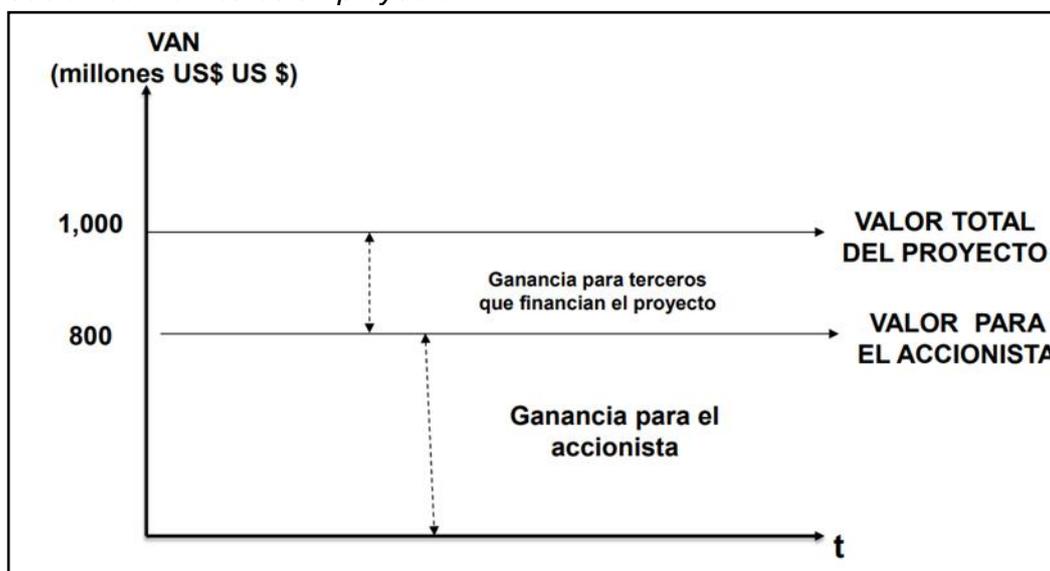
Evaluación de proyectos mineros en ampliación:

- La evaluación de los proyectos mineros de ampliación de capacidad, consiste en determinar la conveniencia de realizar o no la ampliación.
- La evaluación debe realizarse, comparando los beneficios netos adicionales que se generarán con la ampliación y compararlo con la inversión necesaria para la ampliación.
- La dificultad consiste en determinar correctamente los beneficios netos adicionales.

En la Figura 5 se muestra la evaluación económica de un proyecto y la ganancia para los accionistas e inversionistas.

Figura 5

Evaluación económica de un proyecto



Fuente: Gala, Fernando (2020) "Formulación y evaluación de proyectos mineros"

León Cervantes, Gersón (2021) "Optimización de la logística del concreto en operaciones subterráneas"

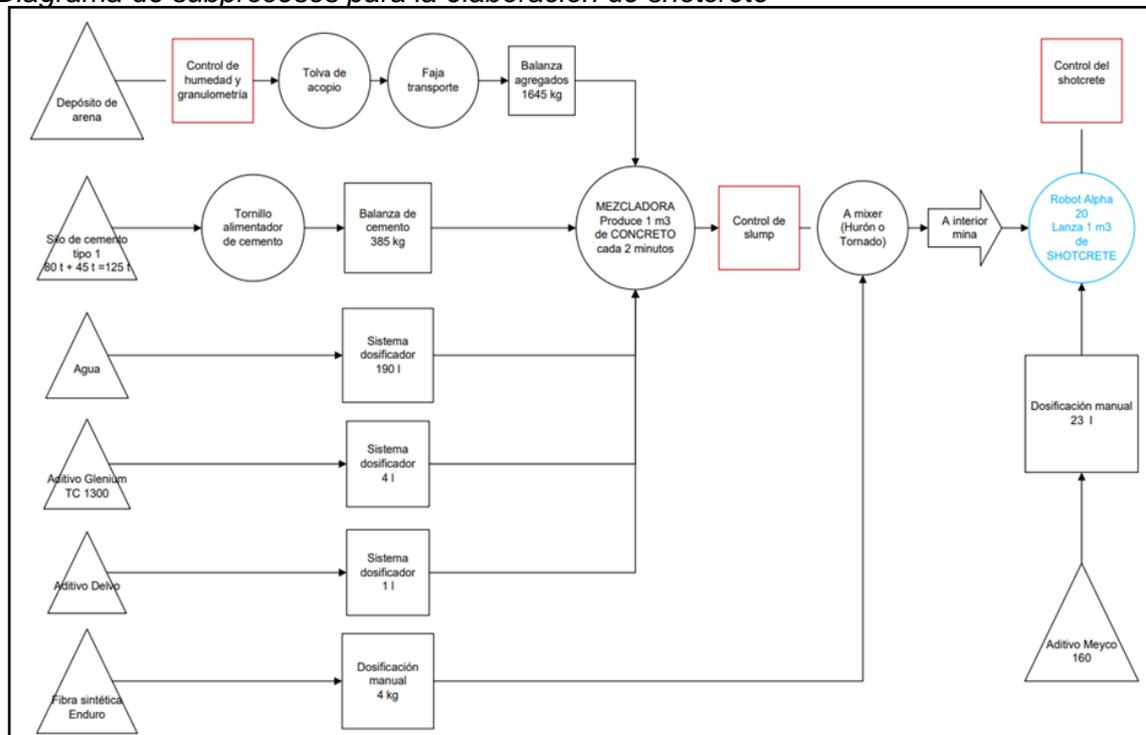
León Cervantes tuvo como finalidad encontrar la mejor opción técnico-económica para el transporte de concreto lanzado (shotcrete) a interior mina, para ello evaluó tres alternativas logísticas excluyentes: (a) Instalar una planta de concreto en superficie y trasladar a interior mina mediante mixers, (b) Instalar una planta de concreto en interior mina en el centro de gravedad de las operaciones, y (c) Instalar una planta en superficie y enviar el concreto a mina por medio de tuberías.

El autor, para la evaluación de los 2 primeros resultados, se cuenta con los resultados obtenidos en las minas San Cristóbal y Cerro de Pasco de la empresa Volcan; y para la tercera alternativa, se cuenta con la data proveniente de la mina Diamond Cullinam en Sudáfrica.

En la siguiente Figura 6 se muestra el diagrama de subprocesos para la elaboración de shotcrete en la planta de la mina San Cristóbal.

Figura 6

Diagrama de subprocesos para la elaboración de shotcrete



Fuente: León Cervantes, Gersón (2021) "Optimización de la logística del concreto en operaciones subterráneas"

1.5 Hipótesis de la Investigación

1.5.1 Hipótesis

Una adecuada evaluación técnico-económica influirá en mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.

1.5.2 Variables

- **Variable dependiente:**

Evaluación técnico-económica.

- **Variable independiente:**

Cumplimiento del programa de transporte del shotcrete (97%).

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Métodos de aplicación de concreto lanzado*

Barreda Gonzales, Rodrigo Alonso (2014) “Diseño de planta subterránea para optimizar y reducir costos en mina Chipmo Cia de Minas Buenaventura”

2.1.1.1 Método vía húmeda. Con el método húmedo es más fácil producir una calidad uniforme a lo largo del proceso de proyección. La mezcla preparada se vacía en una bomba y se impulsa a presión a través de la manguera (Transporte caudaloso).

En la boquilla, al final de la manguera se añade aire al hormigón en una proporción de 7 – 15 m³/min y a una presión de 7 bar. La proyección se realiza manualmente.

El aire se añade para aumentar la velocidad del hormigón y conseguir así una buena compactación y una buena adherencia al sustrato/superficie. Es necesario que se utilice suficiente aire. Para la proyección se requiere un mínimo de 12 m³/min. En la boquilla se agrega acelerantes líquidos para un correcto fraguado.

Con esto se consigue una producción de shotcrete por vía húmeda con una resistencia a la compresión superior a 60 MPa a los 28 días de lanzado.

Ventajas del método vía húmeda

- Bajo rebote (5 – 10%): Con el uso de equipos apropiados y de personal capacitado, se obtienen pérdidas normales que oscilan entre 5 y 10 %, incluso para el caso de proyección de concreto reforzado con fibras.
- Mejor ambiente de trabajo, debido a la reducción del polvo.
- Capas gruesas debido a la efectiva mezcla de materiales.
- Control de la relación agua/cemento y calidad. Dosificación controlada del agua (relación agua/cementante constante y definida).
- Mayor capacidad de producción (40m³ en 8 horas).
- Uso de fibras sintéticas o de acero y posibilidad de utilizar nuevos y avanzados ingredientes/aditivos.

- Economía mejorada en la aplicación del hormigón proyectado.
- Mejor adherencia.
- Mayor resistencia a la compresión y uniformidad de resultados.

Desventajas del método vía húmeda

- Distancia de transporte limitada (máx. 300 m.)
- Mayor exigencia en el diseño de mezclas. Mayores demandas en la calidad del agregado.
- Costos de limpieza (puede ser resuelto utilizando ingredientes de control de la hidratación).
- Tiempo de manejabilidad limitado (utilizando ingredientes de control de la hidratación).
- Sólo se permiten interrupciones limitadas.

3.1.1.2 Método vía seca. Se caracteriza por lo siguiente:

- Este es el método clásico y no requiere de una mecanización especializada.
- Se adapta con facilidad a las condiciones cambiantes del terreno, sobre todo cuando hay presencia de agua.
- Todos los materiales, incluyendo los aditivos, son mezclados previamente al recorrido del material por la manguera, hasta la tobera.
- El agua requerida para la hidratación de la mezcla, es introducida en la boquilla para ser manualmente regulada, por lo que depende de la habilidad del operador.
- El equipo es más compacto, por lo tanto, más adaptable en túneles con espacio limitado o de sección pequeña.
- La mezcla puede contener agregados hasta $\varnothing \frac{3}{4}$ " de tamaño máximo.
- Se produce polvo durante la operación de lanzado.
- La pérdida por rebote inevitablemente es alta.
- La producción es relativamente baja en comparación a los otros métodos.

2.1.2 Proceso productivo de shotcrete

Bardales Sánchez, Jimmy (2015) “Tecnología aplicada para reducción de fragua del concreto lanzado en mina chungar”

En la minería, el factor tiempo es uno de los componentes más relevantes, por lo cual, se ha desarrollado diseños alternativos para la reducción del tiempo de fraguado del shotcrete lanzado, y los principales objetivos es mantener la seguridad, mejorar el ciclo de minado, optimizar los costos de producción y controlar la estabilidad de las excavaciones.

Con el avance de la tecnología, ahora se dispone de equipos adecuados para la determinación de resistencia a edades tempranas, logrando obtener la curva de evolución de la resistencia desde minutos hasta horas y días con mayor exactitud.

En la Figura 7 se muestra el proceso productivo actual de shotcrete en la unidad minera Chungar.

Figura 7

Proceso productivo del shotcrete



Fuente: Bardales Sanchez, Jimmy (2015) “Tecnología aplicada para reducción de fragua del concreto lanzado en mina chungar”

2.1.3 Plantas de hormigón

Hess Group (2020) “Maquinaria para la fabricación de productos de concreto”

Las características de las maquinarias para la fabricación de shotcrete son las siguientes:

- Construcción autoportante con cuadro inferior y superior

- Sistema de accionamiento separado por la corona de herramientas y las coronas de estrellas de mezclado
- Posibilidad de paró y puesta en marcha de la mezcladora con carga en cualquier momento
- Dos puertas laterales opuestas de gran acceso para trabajos de limpieza y mantenimiento
- Dos compuertas inferiores de descarga
- Alimentación especial de agua para reducir considerablemente los restos de hormigón y el esfuerzo de limpieza
- Opcionalmente para la alimentación de cemento en el mezclador se ofrece una instalación de transporte especial (alimentación de cemento casi sin polvo)
- Por la elevada intensidad de mezclado su diseño es apto para hormigones con una relación agua-cemento muy baja.

2.1.4 Criterios de evaluación económica

Sagan, N (2017) “Cálculo y análisis de la viabilidad económica en proyectos de inversión”

La evaluación del proyecto compara, mediante distintos instrumentos, si el flujo de caja proyectado permite al inversionista obtener la rentabilidad deseada, además de recuperar la inversión. Los métodos más comunes corresponden a los denominados valor actual neto, más conocidos como VAN, la tasa interna de retomo o TIR, el período de recuperación y la relación beneficio-costos.

2.1.4.1 Valor actual neto (VAN). Es el método más conocido, mejor y más generalmente aceptado por los evaluadores de proyectos. Mide la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. Para ello, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja, proyectados a partir del primer período de operación, y le resta la inversión total expresada en el momento cero.

Si el resultado es mayor que cero, mostrará cuánto se gana con el proyecto, después de recuperar la inversión, por sobre la tasa i que se exigía de retorno al proyecto;

si el resultado es igual a cero, indica que el proyecto reporta exactamente la tasa i que se planteaba obtener después de recuperar el capital invertido; y si el resultado es negativo, muestra el monto que falta para ganar la tasa que se deseaba obtener después de recuperada la inversión.

2.1.4.2 Tasa interna de retorno (TIR). Un segundo criterio de evaluación lo constituye la tasa interna de retorno, TIR, que mide la rentabilidad como porcentaje.

Las tres principales razones de menos aceptación de la TIR como criterio de evaluación son:

- Entrega un resultado que conduce a la misma regla de decisión que la obtenida con el VAN.
- No sirve para comparar proyectos, por cuanto una TIR mayor no es mejor que una menor, ya que la conveniencia se mide en función de la cuantía de la inversión realizada.
- Cuando hay cambios de signos en el flujo de caja, por ejemplo por una alta inversión durante la operación, pueden encontrarse tantas tasas internas de retorno como cambios de signo se observen en el flujo de caja.

2.1.4.3 Período de recuperación de la inversión. El período de recuperación de la inversión, PRI, es el tercer criterio más usado para evaluar un proyecto y su objetivo es medir en cuánto tiempo se recupera la inversión, incluyendo el costo de capital involucrado.

2.1.4.4 Relación beneficio-costos (B/C). La relación beneficio-costos compara el valor actual de los beneficios proyectados con el valor actual de los costos, incluida la inversión. El método lleva a la misma regla de decisión del VAN, ya que cuando este es cero, la relación beneficio-costos será igual a uno.

Si el VAN es mayor que cero, la relación será mayor que uno, y si el VAN es negativo, esta será menor que uno. Este método no aporta ninguna información importante que merezca ser considerada.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Evaluación:

La evaluación es un instrumento que ayuda a medir objetivamente ciertas magnitudes cuantitativas resultantes del estudio del proyecto; para medir objetivamente las premisas y supuestos estas deben nacer de la realidad misma en la que el proyecto estará inserto y en el que deberá rendir sus beneficios.

2.2.2 Mixer:

El mixer es un vehículo equipado con un tambor capaz de contener y mezclar el conjunto de elementos que serán la base de una planta o construcción, con este, se puede transportar hormigón o concreto pre mezclado, evitando que se endurezca. Una de las ventajas de los camiones mezcladores, es que permite transportar la mezcla sin que pierda sus propiedades y la humedad.

2.2.3 Transporte:

El transporte es el medio por dónde circula el shotcrete desde la planta hasta el área a sostener, este transporte se puede realizar por medio de equipos móviles bajo rueda o por medio de tuberías aprovechando la gravedad.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Tipo y Diseño de la Investigación

3.1.1 Tipo de la investigación

El tipo de la presente investigación con respecto al enfoque es cuasi experimental porque se basa en la recolección y análisis de datos para plantear una solución al incumplimiento en el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.

El tipo de la presente investigación con respecto al alcance es explicativo ya que se evaluará las causas del incumplimiento en el proceso de transporte del shotcrete a interior mina para mejorar la productividad de los equipos.

3.1.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental porque se observará los fenómenos o acontecimientos en el incumplimiento del proceso de transporte del shotcrete tal y como se dan en su contexto actual, para después analizarlos y proponer alternativas de mejora.

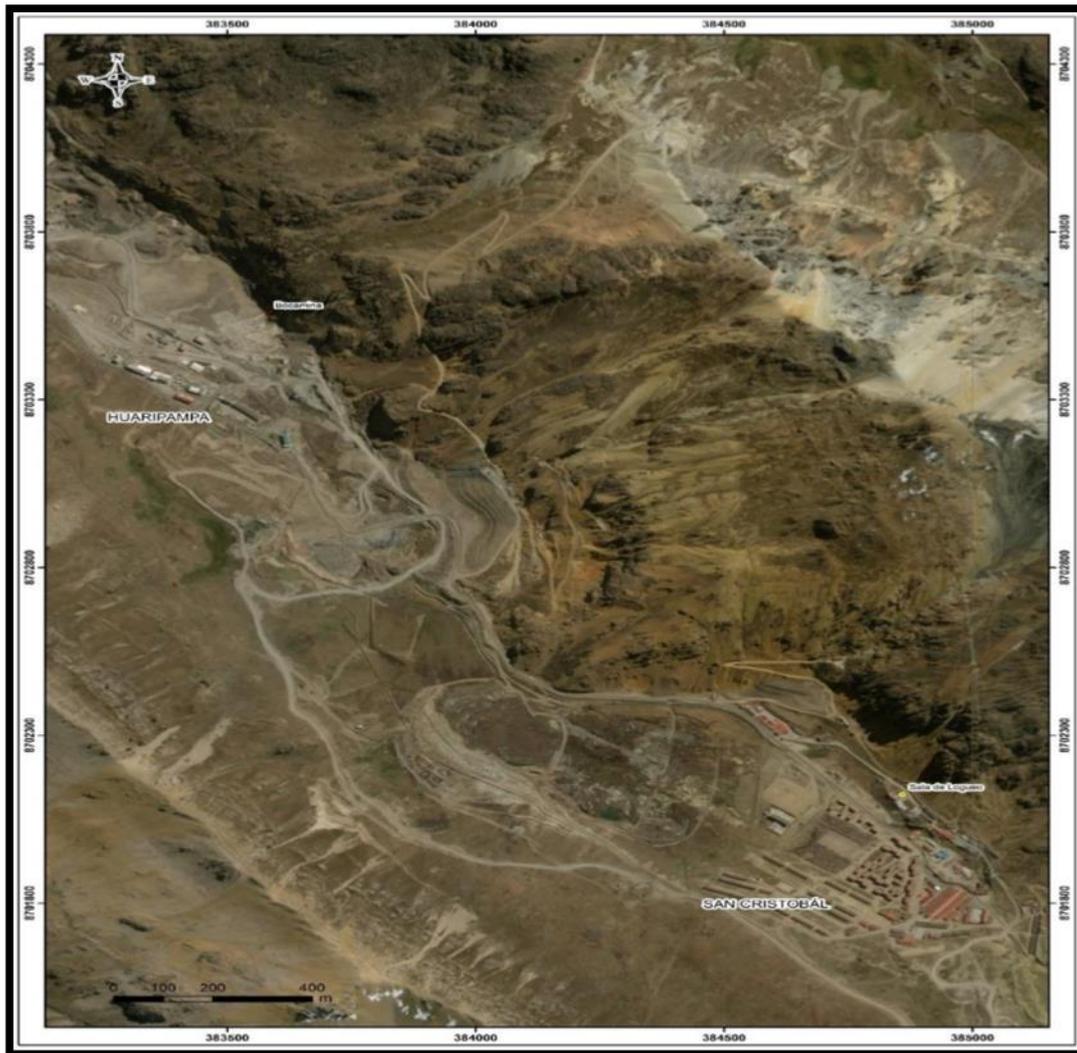
3.2 Unidad de Análisis

La unidad de análisis del presente proyecto de investigación es la Unidad Económica Activa San Cristóbal que es propiedad de Volcán Compañía Minera S.A.A., se encuentra ubicado en el flanco este de la Cordillera de los Andes Centrales del Perú con coordenadas UTM, N 8702115, E 384856 ubicada en el distrito de Yauli - la Oroya, Departamento de Junín, con altitudes promedio entre los 4,500.00 - 4,700.00 m.s.n.m.

En la Figura 8 se muestra la ubicación general del campamento en UEA San Cristobal (San Cristobal) y oficinas administrativas (Huaripampa)

Figura 8

Ubicación general del campamento de la UEA San Cristobal



Fuente: "Elaboración Propia"

3.3 Matriz de Consistencia

"Evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina".

En la Tabla 3 se muestra la matriz de consistencia del presente proyecto de investigación.

Tabla 3*Matriz de consistencia*

OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
		DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
Desarrollar una evaluación técnico-económica para mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.	Una adecuada evaluación técnico-económica influirá en mejorar el proceso de transporte del shotcrete a interior mina.	Evaluación técnico-económica.	Cumplimiento del programa de transporte del shotcrete (97%).	Valor Presente Neto. Tasa Interna de Retorno.	Seguimiento in situ al proceso de transporte del shotcrete. Análisis de casos en diferentes proyectos mineros.

Fuente: "Elaboración propia"

3.4 Recolección de datos

El trabajo de suficiencia se enfoca en la mejora de los tiempos de transporte del shotcrete desde la planta hasta interior mina para el sostenimiento de labores.

3.4.1 *Transporte actual del shotcrete*

En la Tabla 4 se muestra el shotcrete acumulado transportado al año por mixers desde la planta de superficie hasta interior mina.

Tabla 4

Suministro de shotcrete

SUMINISTRO DE SHOTCRETE - MINA SAN CRISTOBAL						
Mes	Shotcrete	R. Operativo	R. Pasivo	Mortero	Desecho	TOTAL
Enero	4,904.7	327.0	57.8	313.4	104.5	5,707.4
Febrero	4,608.0	313.3	54.5	253.9	34.0	5,263.7
Marzo	3,955.7	220.7	32.9	124.4	34.5	4,368.2
Abril	4,141.3	413.3	136.5	106.3	44.5	4,841.9
Mayo	4,442.4	496.8	104.7	52.8	25.9	5,122.6
Junio	4,261.4	467.6	77.1	68.9	27.5	4,902.5
Julio	4,414.3	572.4	54.4	213.8	43.8	5,298.7
Agosto	4,675.3	593.3	85.0	142.4	67.2	5,563.2
Setiembre	4,196.3	603.6	6.7	225.6	43.4	5,075.6
Octubre	2,780.0	1230.7	1082.6	218.2	36.0	5,347.5
Noviembre	4,345.2	549.0	391.2	111.2	24.4	5,421.0
Diciembre	5,644.1	252.1	227.4	68.2	74.2	6,266.0
TOTAL	52,368.7	6,039.8	2,310.8	1,899.1	559.9	63,178.3

Fuente: "Elaboración propia"

Del gráfico se evidencia que el 3.9% del shotcrete transportado no se utiliza según la planificación mensual, esta mezcla es desechada o lanzado de forma de mortero.

3.4.2 Tiempo de transporte del shotcrete

En la Tabla 5 se muestra el tiempo de transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 5

Tiempo de transporte del shotcrete

TIEMPO DE TRANSPORTE DEL SHOTCRETE - MINA SAN CRISTOBAL (HR)											
Labor	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	PROMEDIO
RP_326_1	3.7	4.3	3.9	3.1	3.9	3.7	4.0	3.9	3.5	3.6	3.8
CA_326_31	3.7	4.3	4.1	3.6	3.7	4.1	4.1	3.7	3.3	4.2	3.9
CA_04_326_1	4.4	3.7	4.7	3.8	4.0	4.4	3.2	3.5	4.0	3.6	3.9
SN_315_3E	4.1	3.4	4.1	3.9	3.8	4.4	4.5	3.1	4.3	4.4	4.0
SN_315_3W	4.1	3.9	4.0	4.0	4.4	4.1	3.3	4.4	3.9	4.2	4.0
AC_79_0E	4.5	3.7	3.3	4.1	3.9	4.0	4.7	4.7	4.1	4.7	4.2
CA_01_79_0E	4.4	4.0	3.9	3.4	3.9	3.9	3.9	3.5	4.3	4.3	3.9
SN_315_2E	3.3	4.1	4.3	3.2	4.1	3.7	4.0	3.8	3.4	4.0	3.8
SN_315_2W	4.0	3.7	4.5	3.9	4.1	4.2	3.9	4.2	3.3	4.5	4.0
SN_315_0W	4.1	3.6	3.6	4.4	4.1	3.1	3.4	4.2	3.5	4.2	3.8
RP_325 (-)	4.0	3.9	4.1	3.5	4.2	3.8	3.8	4.2	4.2	4.1	4.0
CA_1_XC_156	4.2	4.1	3.8	3.8	3.8	4.3	4.2	4.2	3.8	4.0	4.0
AC_325_3B	4.5	3.7	4.0	3.3	4.2	4.0	3.9	4.8	4.6	4.1	4.1
CA_325_14	4.3	4.4	4.1	4.1	4.2	4.4	4.3	4.4	4.1	4.2	4.3
SN_80_2-E	3.2	4.7	3.5	3.9	4.3	4.2	4.6	4.3	3.6	3.9	4.0
SN_80_2-W	3.1	4.5	3.8	4.5	3.8	3.5	3.4	4.2	4.0	3.2	3.8
RP_314 (+)	3.8	3.5	4.6	3.9	3.9	3.2	4.2	4.6	3.6	3.5	3.9
BP_780_2-E	3.4	3.7	3.7	4.1	4.0	4.5	4.0	4.1	3.1	3.1	3.8
CA_10_314	4.0	3.8	4.5	4.0	4.0	3.5	4.0	4.2	3.5	4.2	4.0
CA_01_780_2	4.4	4.7	4.6	4.8	3.6	4.5	4.9	4.8	4.2	4.3	4.5
CA_11_314	4.2	3.8	3.7	4.5	4.0	4.1	5.0	4.0	4.6	4.6	4.2
AC_80_3E	4.1	4.4	3.6	3.7	4.4	3.4	4.3	4.4	4.3	4.4	4.1
SN_80_3E	3.2	4.6	4.5	3.3	3.8	3.3	3.8	3.8	4.4	3.5	3.8
XC_314	4.1	3.8	3.8	4.1	3.4	3.7	4.1	3.4	4.6	3.9	3.9
SN_80_3W	4.5	3.2	3.9	4.7	4.0	3.3	3.8	3.4	4.1	4.3	3.9
SN_70_0E	3.8	4.6	4.0	4.5	4.0	4.6	3.5	3.6	3.6	4.2	4.0
SN_70_0W	3.6	3.5	4.6	3.7	3.6	3.8	4.2	4.4	3.3	3.6	3.8
AC_69_0E	4.1	3.4	3.7	3.8	3.6	4.6	3.8	4.9	3.1	3.6	3.9
SN_69_0E	3.4	3.4	4.6	3.6	3.9	4.0	4.1	4.4	3.7	3.4	3.8
SN_69_0W	3.8	3.3	4.4	4.1	4.5	4.0	4.2	3.2	3.6	4.2	3.9
SN_57_5E	4.3	3.6	4.6	4.1	3.9	3.4	4.4	4.2	4.2	3.4	4.0
RP_874_2	4.4	4.5	4.3	4.3	4.5	3.8	3.3	4.3	4.1	3.5	4.1
CA_06_874-2	3.6	3.3	4.3	3.9	3.7	3.9	4.2	4.2	3.8	4.5	3.9
SN_70_6 E	3.3	4.2	4.7	3.9	4.1	4.4	3.5	4.1	3.1	3.4	3.9
RP_617_1E	3.8	4.1	4.6	3.9	4.0	4.5	3.8	3.7	3.4	4.1	4.0
AC_70_0E	4.0	3.5	4.0	4.0	3.8	3.7	3.4	4.6	3.8	4.5	3.9
PROMEDIO	3.9	3.9	4.1	3.9	4.0	3.9	4.0	4.1	3.8	4.0	4.0

Fuente: "Elaboración propia"

En la Tabla 6 se muestra el tiempo de transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 6

Tiempo de transporte del shotcrete

TIEMPO DE TRANSPORTE DEL SHOTCRETE - MINA SAN CRISTOBAL (HR)											
Labor	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	Día 16	Día 17	Día 18	Día 19	Día 20	Promedio
RP_326_1	3.6	4.3	4.0	4.8	4.6	4.8	4.0	3.8	3.7	4.1	4.2
CA_326_31	4.1	4.2	3.8	3.1	3.3	4.6	4.1	3.5	3.9	3.3	3.8
CA_04_326_1	4.0	3.7	3.9	4.5	4.4	3.8	3.8	3.4	4.0	4.2	4.0
SN_315_3E	4.8	4.4	4.4	3.9	4.2	3.8	3.8	4.2	3.8	4.3	4.2
SN_315_3W	4.3	3.7	4.9	3.1	3.6	3.9	4.4	3.5	4.4	4.4	4.0
AC_79_0E	4.2	3.8	4.2	3.6	3.7	3.6	4.0	4.1	4.4	3.9	4.0
CA_01_79_0E	4.2	3.6	3.4	4.0	3.8	3.9	3.8	3.8	3.4	3.8	3.8
SN_315_2E	4.2	4.0	3.2	3.8	4.2	3.9	4.2	3.8	4.0	3.2	3.9
SN_315_2W	4.4	4.5	3.7	4.6	3.7	3.4	3.5	3.9	4.2	4.6	4.0
SN_315_0W	3.9	3.9	4.4	4.6	4.7	4.0	3.8	3.8	3.6	4.4	4.1
RP_325 (-)	4.1	3.4	3.1	4.1	4.1	4.3	3.5	3.7	4.2	4.6	3.9
CA_1_XC_156	4.7	4.3	3.8	4.3	4.0	3.3	4.2	3.6	3.9	3.2	3.9
AC_325_3B	3.8	3.6	4.2	3.2	4.0	4.5	4.0	4.4	4.4	4.0	4.0
CA_325_14	4.2	4.3	4.5	3.7	3.8	3.8	3.8	4.0	4.4	4.5	4.1
SN_80_2-E	4.4	4.7	3.7	3.8	3.5	4.2	4.0	4.5	3.9	3.7	4.1
SN_80_2-W	4.8	3.3	4.5	3.7	3.5	4.3	4.5	4.4	3.9	4.0	4.1
RP_314 (+)	3.8	3.8	3.9	4.1	4.4	4.1	4.4	4.2	4.1	3.8	4.1
BP_780_2-E	4.4	3.5	3.8	3.9	3.6	3.7	4.2	4.2	4.7	3.4	3.9
CA_10_314	4.4	4.8	3.8	4.8	3.6	4.6	4.2	3.6	4.6	4.1	4.2
CA_01_780_2	4.6	4.5	4.4	4.6	3.7	3.8	3.9	4.5	4.9	3.9	4.3
CA_11_314	3.7	3.4	4.1	4.2	4.5	3.8	4.2	3.9	4.0	4.5	4.0
AC_80_3E	4.1	3.4	4.1	4.7	4.2	4.0	4.1	3.4	4.7	4.4	4.1
SN_80_3E	3.6	3.5	4.3	4.5	3.9	3.3	4.0	3.6	4.0	4.6	3.9
XC_314	3.9	4.2	4.3	4.5	4.1	4.4	4.1	3.9	3.9	3.5	4.1
SN_80_3W	3.9	3.9	4.1	3.3	3.7	3.5	3.8	3.8	3.6	3.6	3.7
SN_70_0E	4.0	3.6	4.9	3.8	4.1	4.2	3.2	3.6	4.2	3.7	3.9
SN_70_0W	3.6	4.5	3.7	4.4	4.1	4.2	4.4	4.0	4.0	4.5	4.2
AC_69_0E	3.8	3.4	4.1	4.1	4.0	3.9	3.6	3.8	3.9	3.2	3.8
SN_69_0E	4.5	4.7	4.3	4.1	4.3	4.0	4.7	4.8	3.9	4.7	4.4
SN_69_0W	4.2	3.9	4.3	3.9	4.2	3.9	3.4	4.1	4.1	3.8	4.0
SN_57_5E	3.4	3.7	3.8	3.4	3.9	4.9	3.6	4.2	3.4	4.1	3.8
RP_874_2	4.5	4.8	3.8	4.2	3.9	3.5	3.9	4.3	4.4	4.2	4.1
CA_06_874-2	4.2	3.7	3.8	4.3	3.1	3.9	3.9	3.3	3.8	4.2	3.8
SN_70_6 E	3.4	4.6	4.6	4.3	3.5	3.8	4.1	3.8	4.1	4.2	4.0
RP_617_1E	4.0	4.7	4.0	3.9	3.9	3.2	3.3	3.9	3.4	4.8	3.9
AC_70_0E	4.4	4.9	4.4	4.3	3.3	3.4	3.9	3.2	3.5	4.8	4.0
PROMEDIO	4.1	4.0	4.1	4.1	3.9	3.9	4.0	3.9	4.0	4.1	4.0

Fuente: "Elaboración propia"

En la Tabla 7 se muestra el tiempo de transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 7

Tiempo de transporte del shotcrete

TIEMPO DE TRANSPORTE DEL SHOTCRETE - MINA SAN CRISTOBAL (HR)											
Labor	Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25	Día 26	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30	Promedio
RP_326_1	3.9	3.9	4.1	4.3	3.8	3.7	3.3	3.7	4.1	4.6	3.9
CA_326_31	3.5	3.7	4.4	3.5	4.6	4.4	4.3	3.8	3.6	3.9	4.0
CA_04_326_1	4.2	3.6	3.6	3.8	3.3	3.8	4.0	4.1	3.2	3.7	3.7
SN_315_3E	3.9	4.1	4.4	3.9	4.6	3.5	3.2	4.0	4.2	3.9	4.0
SN_315_3W	3.4	3.6	4.5	4.7	3.2	4.7	4.1	3.8	4.0	4.0	4.0
AC_79_0E	4.4	3.8	4.7	4.3	4.2	3.8	4.0	4.3	4.1	3.7	4.1
CA_01_79_0E	3.9	3.5	4.0	4.3	4.5	4.0	3.7	3.8	4.5	4.6	4.1
SN_315_2E	3.6	4.1	4.2	3.8	3.6	4.0	3.5	4.1	4.4	4.7	4.0
SN_315_2W	4.4	3.7	3.9	4.2	3.7	4.8	4.6	4.3	4.0	3.4	4.1
SN_315_0W	3.7	3.7	4.0	4.8	4.0	4.2	3.3	3.2	4.3	3.9	3.9
RP_325 (-)	3.3	3.5	3.9	4.1	3.9	3.2	3.8	4.3	4.2	4.3	3.9
CA_1_XC_156	3.5	4.0	4.2	4.3	4.2	4.0	4.1	4.5	3.8	3.3	4.0
AC_325_3B	4.3	4.3	3.5	4.4	4.3	4.0	3.4	3.7	3.2	3.6	3.9
CA_325_14	3.7	4.8	4.0	3.3	3.2	4.2	4.7	4.5	4.3	3.6	4.0
SN_80_2-E	4.8	3.4	4.5	3.9	4.3	3.7	4.1	4.3	3.7	4.0	4.1
SN_80_2-W	4.0	4.2	3.9	3.4	4.3	4.1	3.9	3.9	3.6	3.6	3.9
RP_314 (+)	4.2	3.9	4.2	4.5	4.4	4.2	4.1	3.3	3.7	3.4	4.0
BP_780_2-E	3.7	3.2	4.1	3.4	3.4	3.9	4.3	3.7	3.9	4.4	3.8
CA_10_314	4.0	3.5	4.0	3.7	3.8	4.4	4.4	4.2	4.1	4.3	4.0
CA_01_780_2	4.3	3.5	3.6	3.7	3.9	3.6	3.8	3.1	4.6	4.8	3.9
CA_11_314	3.9	3.6	4.4	4.2	4.5	3.9	4.2	4.2	4.0	4.1	4.1
AC_80_3E	3.8	3.5	3.9	4.1	4.0	4.1	4.3	4.6	3.4	4.1	4.0
SN_80_3E	3.4	4.5	3.8	4.5	3.5	4.7	4.1	4.3	3.8	4.7	4.1
XC_314	3.4	4.7	4.9	4.4	3.8	4.6	3.7	4.0	4.0	4.1	4.2
SN_80_3W	4.6	4.4	4.3	3.9	4.8	3.8	4.4	4.2	4.0	4.3	4.3
SN_70_0E	4.3	4.3	3.3	3.9	4.5	3.9	3.5	4.1	4.0	4.5	4.0
SN_70_0W	3.5	4.0	3.2	4.2	3.5	4.3	3.8	3.5	4.0	3.4	3.7
AC_69_0E	3.9	4.3	4.4	4.0	4.0	3.8	4.5	4.0	4.0	3.8	4.1
SN_69_0E	3.8	3.8	4.1	4.3	4.2	4.3	4.5	4.2	3.7	3.4	4.0
SN_69_0W	4.0	4.0	3.4	4.1	3.1	3.9	3.9	3.8	3.7	4.9	3.9
SN_57_5E	4.8	3.5	4.0	3.9	4.4	5.0	4.2	4.0	4.5	3.9	4.2
RP_874_2	3.4	4.6	4.4	4.3	3.7	4.0	4.0	3.1	3.8	4.2	4.0
CA_06_874-2	4.4	4.9	4.2	4.0	4.7	3.9	3.4	3.7	3.8	3.7	4.1
SN_70_6 E	4.1	4.1	4.3	4.1	3.6	4.0	3.5	4.1	3.3	3.5	3.9
RP_617_1E	3.9	4.0	3.9	3.9	4.1	3.3	4.7	3.7	4.1	4.3	4.0
AC_70_0E	3.7	4.0	4.6	4.3	4.7	4.3	3.8	3.6	3.9	3.8	4.1
PROMEDIO	3.9	3.9	4.1	4.1	4.0	4.1	4.0	3.9	3.9	4.0	4.0

Fuente: "Elaboración propia"

De las tablas se evidencia que el tiempo de transporte del shotcrete desde la planta de superficie hasta interior mina es de 4.0 horas/ciclo.

3.4.2.1 Causas de las demoras en el transporte del shotcrete. En la tabla 5.5 se muestra las principales demoras operativas en el transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 8

Demoras operativas en el transporte del shotcrete

DEMORAS OPERATIVAS EN EL TRANSPORTE DEL SHOTCRETE													
Ítem	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	PROMEDIO	%	
Falla mecánica de la planta	0.7	0.2	0.3	0.5	0.5	0.7	0.3	0.5	0.6	0.2	0.4	25 %	
Falla mecánica de los mixers	0.5	0.2	0.3	0.1	0.3	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	21 %	
Falla mecánica de otros equipos	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.1	0.5	0.4	21 %	
Esperando frente de trabajo	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.0	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	13 %	
Falta de operador	0.1	0.3	0.0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	11 %	
Otros	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	10 %	
PROMEDIO	0.4	0.2	0.3	1.8									

Fuente: "Elaboración propia"

En la Figura 9 se muestra las demoras operativas en el transporte del shotcrete desde una planta en superficie hasta las labores en interior mina.

Figura 9

Demoras operativas en el transporte del shotcrete



Fuente: "Elaboración propia"

En la Tabla 9 se muestra las principales demoras operativas en el transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 9

Demoras operativas en el transporte del shotcrete

DEMORAS OPERATIVAS EN EL TRANSPORTE DEL SHOTCRETE												
Ítem	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	Día 16	Día 17	Día 18	Día 19	Día 20	Promedio	%
Falla mecánica de la planta	0.4	0.2	0.4	0.3	0.6	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	22 %
Falla mecánica de los mixers	0.4	0.5	0.4	0.6	0.3	0.2	0.1	0.3	0.6	0.6	0.4	22 %
Falla mecánica de otros equipos	0.4	0.3	0.5	0.4	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	0.4	0.3	18 %
Falta de operador	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.2	12 %
Esperando frente de trabajo	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	12 %
Otros	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	10 %
PROMEDIO	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	1.7	

Fuente: "Elaboración propia"

En la Figura 10 se muestra las demoras operativas en el transporte del shotcrete desde una planta en superficie hasta las labores en interior mina.

Figura 10

Demoras operativas en el transporte del shotcrete



Fuente: "Elaboración propia"

En la tabla 5.7 se muestra las principales demoras operativas en el transporte del shotcrete desde la planta en superficie hasta interior mina.

Tabla 10

Demoras operativas en el transporte del shotcrete

DEMORAS OPERATIVAS EN EL TRANSPORTE DEL SHOTCRETE												
Ítem	Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25	Día 26	Día 27	Día 28	Día 29	Día 30	Promedio	%
Falla mecánica de la planta	0.4	0.8	0.4	0.4	0.6	0.6	0.2	0.5	0.3	0.4	0.5	26 %
Falla mecánica de los mixers	0.2	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	22 %
Falla mecánica de otros equipos	0.3	0.3	0.1	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	17 %
Esperando frente de trabajo	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	11 %
Falta de operador	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	10 %
Otros	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	10 %
PROMEDIO	0.2	0.3	0.2	0.3	1.7							

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se muestra las demoras operativas en el transporte del shotcrete desde una planta en superficie hasta las labores en interior mina.

Figura 11

Demoras operativas en el transporte del shotcrete



Fuente: Elaboración propia

De la tabla se evidencia que las principales demoras operativas en el transporte del shotcrete desde la planta de superficie hasta interior mina son las fallas mecánicas de la planta, de los mixers y de otros equipos móviles en interior mina.

3.5 Procesamiento de la información

3.5.1 Cumplimiento del programa de sostenimiento con shotcrete

En la Tabla 12 se muestra el cumplimiento del programa de sostenimiento con shotcrete en un intervalo de un año.

Tabla 11*Cumplimiento del programa de sostenimiento con shotcrete.*

CUMPLIMIENTO DEL PROGRAMA DE SHOTCRETE - MINA SAN CRISTOBAL			
Mes	Programa	Ejecutado	CUMPLIMIENTO
Enero	5,100.0	4,904.7	96%
Febrero	4,900.0	4,608.0	94%
Marzo	5,050.0	3,955.7	78%
Abril	5,000.0	4,141.3	83%
Mayo	5,100.0	4,442.4	87%
Junio	4,950.0	4,261.4	86%
Julio	5,100.0	4,414.3	87%
Agosto	5,050.0	4,675.3	93%
Setiembre	5,100.0	4,196.3	82%
Octubre	5,050.0	2,780.0	55%
Noviembre	5,100.0	4,345.2	85%
Diciembre	5,800.0	5,644.1	97%
TOTAL	61,300.0	52,368.7	85%

Fuente: Elaboración propia

De las tablas se evidencia que el cumplimiento promedio del programa de sostenimiento en el año fue del 85%.

3.6 Análisis de la información

3.6.1 Proceso productivo del Shotcrete

Para comprender la logística de la operación, es necesario entender previamente cuales son las operaciones unitarias que conforman su proceso productivo, a saber:

3.6.1.1 Selección y control de calidad de insumos. Ideal y deseable hubiera sido no incluir esta etapa dentro del proceso, pues se supone que los insumos llegan en

condiciones óptimas de calidad, listos para mezclarse. En la realidad, el supuesto no se cumple y nos vemos obligados a aumentar una operación unitaria.

La selección y control de insumos son de importancia capital, un error en esta etapa puede provocar la elaboración de un producto no confiable o inservible para el sostenimiento.

Es así que se deben realizar monitoreo y control de todos los insumos.

En la Figura 1.6 se muestra la secuencia de las dos primeras fases: selección de insumos y elaboración. Siguiendo la nomenclatura de los procesos industriales: los triángulos indican almacenaje; los círculos, operación, las flechas, transporte y los cuadrados, puntos de control (sean estos manuales o automáticos)

Los puntos de control son aquellos hitos del proceso donde podemos controlar que los insumos cumplan con los requerimientos mínimos de calidad, a saber:

- **Agua:**

El pH del agua debe ser de preferencia neutro, con una temperatura mínima de 15 grados centígrados, estando libre de sedimentos y partículas que inhiban el proceso de hidratación del concreto. El control de la composición se logra con análisis periódicos de laboratorio; la temperatura, mediante un termómetro.

- **Agregados:**

Se debe monitorear la granulometría, la humedad del agregado, la presencia de arcillas, material orgánico o partículas demasiado angulosas. El control se logra mediante análisis del agregado de acuerdo a lo especificado por la norma ASTM C333.

- **Cemento:**

El cemento debe de cumplir con la norma ASTM C150. La forma práctica de controlarlo es mediante la expedición del certificado de fabricación por parte del fabricante. Importante es también almacenarlo en un silo que cumpla las condiciones requeridas de temperatura y hermeticidad.

- **Aditivos:**

Los aditivos más usados para elaborar el concreto son los estabilizadores y reductores de agua, los cuales son regulados por la norma ASTM 4945. El control se logra manteniendo al día las certificaciones de fabricación.

- **Fibra:**

La fibra puede ser metálica o sintética. En ambos casos es importante evitarse la contaminación con aceite, grasa, cloruros u otra sustancia. En el caso de la fibra metálica, debe almacenarse en recipientes secos a fin de evitarse la posibilidad de corrosión. El control se logra manteniendo las certificaciones de fabricación al día.

3.6.1.2 Elaboración del producto intermedio. Hablamos todavía de un producto intermedio; el concreto, compuesto hasta este momento por: agua, cemento, agregados, fibra, aditivos estabilizantes y aditivos reguladores de agua.

Luego de obtenido el control previo de los insumos que ingresan al proceso, la segunda fase consiste en la dosificación automática y mezcla de dichos componentes. El empleo de una planta automatizada de concreto permite una alta confiabilidad en las proporciones de los componentes minimizando los sobrecostos /inseguridades por excesos/defectos.

3.6.1.3 Transporte. Esta es la etapa en la cual está centrado el problema logístico, objeto del presente estudio y donde puede obtenerse la mayor eficiencia y por ende, el mayor ahorro. El costo en las etapas anteriores depende sólo de la cantidad de material producido y de las horas-hombre necesarias para el control; sin embargo, en esta nueva etapa debemos añadir otro objeto de costo: la distancia a transportarse los insumos y/o la distancia a transportarse el concreto.

Es así que se generan tres alternativas de transporte, cada cual con sus respectivas ventajas y desventajas, saber:

- Elaborar el concreto en superficie y trasladarlo por medio de mixers al pie de la labor en interior mina (Modalidad empleada en Volcan – San Cristóbal).

- Trasladar los insumos a una planta de concreto ubicada en interior mina, elaborar la mezcla y trasladarlo por medio de mixers al pie de las labores. (Modalidad empleada en Volcan – Cerro de Pasco)
- Elaborar el concreto y superficie y trasladarlo a interior mina mediante un sistema de tuberías, de donde es trasladado por medio de mixers al pie de las labores.

En estado fresco y de manera previa a cargarse a los mixers, la mezcla debe ser sometida a los siguientes controles de calidad:

- Control del slump o asentamiento (ASTM C143)
- Contenido de aire y peso unitario (ASTM C138)
- Control de temperatura del concreto fresco (ASTM C1064)

3.6.1.4 Lanzado (elaboración del producto final). Se inicia con la llegada del mixer al pie de la labor y su posicionamiento contiguo al robot lanzador de concreto. En esta última fase, el concreto se transforma en concreto lanzado o shotcrete, luego de la adición del aditivo acelerante y la proyección por medios neumáticos.

Son factores operacionales para el éxito en esta etapa:

- Las condiciones de la labor, terreno perfectamente desatado y humedecido de preferencia.
- La presión y caudal del aire comprimido en interior mina debe estar acorde a las especificaciones mínimas del equipo.
- El personal debe poseer la habilidad y técnica adecuada para el lanzado.

Es adecuado en esta etapa proseguir con los siguientes controles de calidad:

- Control de slump o asentamiento al pie de labor (ASTM C143).
- Resistencia compresiva del concreto endurecido (ASTM C39).
- Obtención de testigos diamantinos (ASTM C42).
- Preparación de paneles de concreto (ASTM C1140).
- Resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibra usando cargas centrales (ASTM C1550).

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Evaluación de alternativas

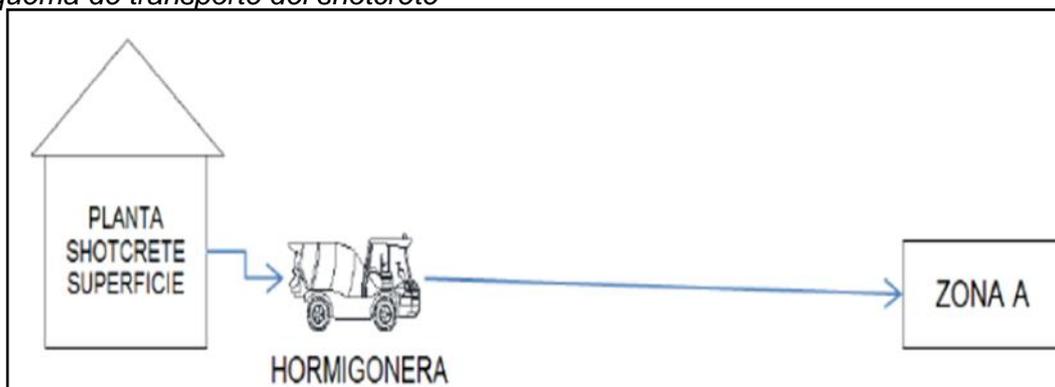
Esta evaluación considerará tanto los aspectos técnicos como los económicos.

4.1.1 Alternativa A: planta de concreto en superficie y transporte en mixers

La Figura 12 presenta un esquema que ilustra el proceso de transporte del shotcrete desde una planta ubicada en superficie hasta las áreas de trabajo subterráneas.

Figura 12

Esquema de transporte del shotcrete



Fuente: Elaboración propia

Inversión:

Las inversiones más importantes se centran en la compra de una planta de concreto nueva, así como en la edificación de la infraestructura requerida para garantizar su operación, entre ellas:

Tabla 12

Costos de inversión – alternativa A

Adquisición Planta de concreto	US\$180.000
Implementación laboratorio	US\$ 80.000
Obras mecánicas y civiles	US\$ 90.000
Adquisición silo de 150 t	US\$ 60.000
Adquisición equipos menores (tornillos de alimentación, sopladores)	US\$ 30.000
Inversión total	US\$440.000

Fuente: Elaboración propia

Costos operativos por metro cúbico:

Los costos operativos incluyen la producción de concreto en la superficie, su transporte hacia el interior de la mina mediante mixers, y su aplicación utilizando robots de lanzado, detallándose de la siguiente manera:

Tabla 13

Costos operativos – alternativa A

Elaboración del concreto	US\$150,00
Lanzado	US\$ 55,00
Transporte en mixer (con una distancia promedio a la labor de 7 km)	US\$ 65,00
Total, por metro cubico	US\$280,00

Fuente: Elaboración propia

Ventajas:

- El costo de inversión (CAPEX) es relativamente reducido al instalar una planta de concreto en superficie, ya que las restricciones para realizar movimientos de tierra, así como trabajos mecánicos y civiles, son menores.
- La implementación de la infraestructura para la operación se lleva a cabo de manera ágil, lo que también facilita el traslado de la planta a otro lugar en caso de ser necesario.
- El abastecimiento de materiales, como agregados, cemento y aditivos, resulta práctico y flexible.
- Las actividades de despacho no se ven condicionadas por limitaciones de espacio.

Desventajas:

- La distancia promedio para las operaciones es de 7 km, considerando una profundidad aproximada de 700 m y una rampa con un gradiente del 10%, lo que incrementa los costos operativos de transporte.
- El tiempo efectivo de trabajo de los equipos es reducido. En promedio, deben recorrer 14 km por ciclo (7 km de ida y 7 km de retorno), lo que limita la cantidad de viajes por turno a aproximadamente 2,5.

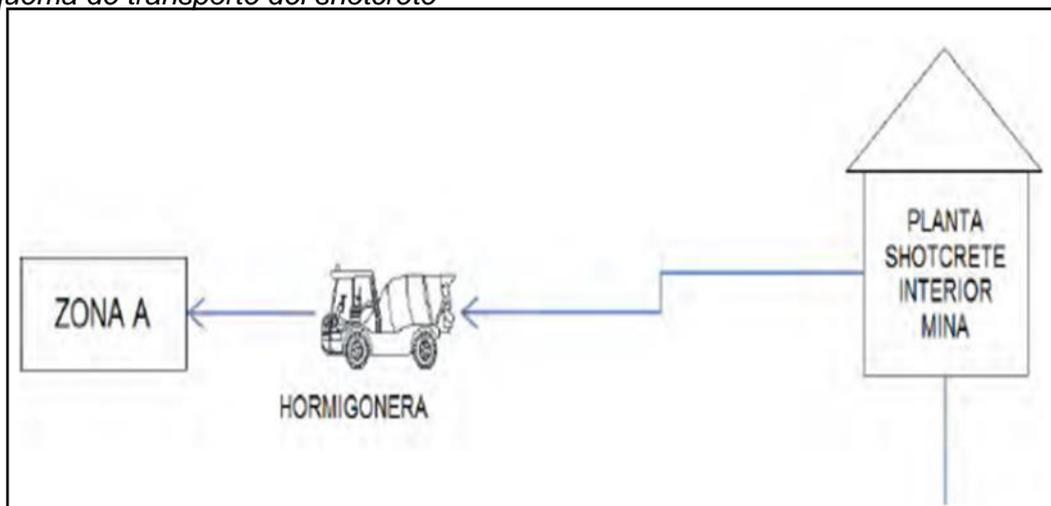
- Se requiere un elevado número de mixers para cumplir con el servicio. Dado que cada mixer tiene una capacidad de transporte de 3 metros cúbicos, el cálculo $5,000 / (30 * 2.5 * 3)$ indica la necesidad de 22 unidades.
- La presencia de mixers genera congestión en las vías de acceso, dificultando el flujo normal de las operaciones.
- La contaminación del aire en la mina aumenta debido a las emisiones de los motores de combustión interna de los mixers.

4.1.2 **Alternativa B: planta de concreto en interior mina y transporte en mixers**

La Figura 13 presenta un esquema que ilustra el proceso de transporte del shotcrete desde una planta ubicada dentro de la mina hasta las áreas de trabajo.

Figura 13

Esquema de transporte del shotcrete



Fuente: "Elaboración propia"

Inversión:

Las inversiones clave se centran en la compra de una planta de concreto y la edificación de la infraestructura subterránea necesaria para su operatividad, específicamente:

Tabla 14*Costos de inversión – alternativa B*

Adquisición Planta de concreto	US\$180.000
Obras mecánicas y civiles	US\$ 120.000
Adquisición equipos menores (tornillos de alimentación, sopladores)	US\$ 30.000
Implementación laboratorio	US\$ 80.000
Excavación de chimenea Raise Borer para el traslado de agregados	US\$ 300.000
Excavación y sostenimiento de la cámara subterránea (50m x 30m x 10m)	US\$ 600.000
Inversión total	US\$ 1.310.000

Fuente: Elaboración propia

Costos operativos por metro cúbico:**Tabla 15***Costos operativos – alternativa B*

Elaboración del concreto	US\$150,00
Lanzado	US\$ 55,00
Transporte en mixer (con una distancia promedio a la labor de 1,5 km)	US\$ 33,00
Transporte de cemento	US\$ 8,00
Total, por metro cubico	US\$ 256,00

Fuente: Elaboración propia

Ventajas

- Los costos operativos son más bajos en comparación con la opción anterior, ya que el costo unitario del transporte de concreto en mixers puede reducirse hasta en un 30% gracias a la disminución de las distancias.
- Contar con una planta ubicada dentro de la mina, equipada con un laboratorio, permite un monitoreo constante y un control eficiente de la calidad del concreto utilizado en las labores.
- La flota de mixers puede reducirse hasta en un 50% en el caso analizado, lo que implica una disminución significativa en los costos de mantenimiento.

- El suministro de agregados se realiza a través de la chimenea R/B, que cuenta con una tolva en su extremo, utilizando únicamente energía potencial gravitatoria para el proceso.

Desventajas

- El CAPEX en este caso es elevado. Además de las instalaciones electromecánicas requeridas en el escenario anterior, se debe romper y retirar 15,000 metros cúbicos de roca en desmonte, lo que a menudo implica un alto costo de oportunidad al desviar equipos destinados a la producción de mineral. Asimismo, la construcción de una chimenea **Raise Borer** (perforación piloto y rimado) para el transporte de agregados representa otra inversión significativa. En este análisis, asumimos que la ventilación en interior mina es adecuada, ya que la instalación de la planta subterránea genera una considerable polución adicional. De no ser así, sería necesaria la construcción de una segunda chimenea **Raise Borer** cercana y dedicada exclusivamente a la ventilación de la cámara.
- El suministro de cemento resulta más complejo, ya que su manejo no se puede mecanizar tan fácilmente como el del agregado. En el caso de Cerro de Pasco, actualmente se transporta mediante volquetes y personal de carga.
- La construcción de la infraestructura operativa, que incluye la preparación de la cámara subterránea y las chimeneas **Raise Borer**, tiene un avance lento.
- Las rampas de acceso a la cámara deben ser acondicionadas para permitir el tránsito de volquetes.
- El espacio disponible en el subsuelo para las operaciones de despacho es considerablemente menor en comparación con el espacio en superficie.
- El flujo operativo depende de varios factores: la disponibilidad de los volquetes, la congestión vehicular y el estado de las rampas.
- La polución en el interior de la mina aumenta con la descarga y manipulación de las bolsas de cemento.

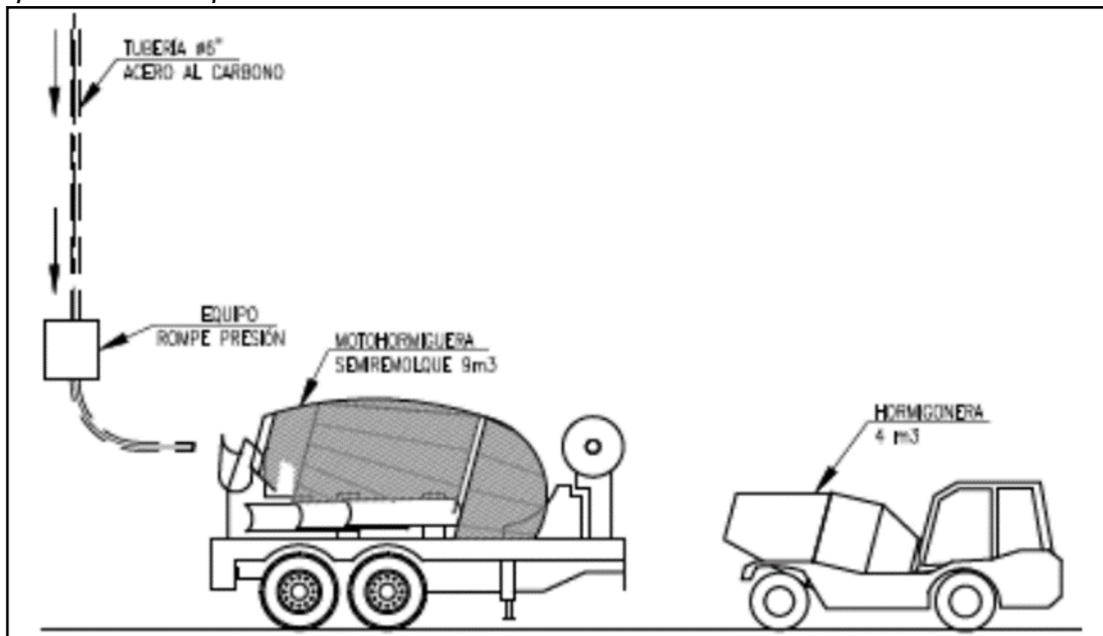
- Aunque la cantidad de mixers se reduce, la congestión vehicular y la emisión de gases no disminuyen debido al ingreso de volquetes con cemento al interior de la mina.

4.1.3 **Alternativa C: planta de concreto en superficie y transporte por tuberías**

La Figura 14 presenta un esquema que ilustra el proceso de transporte del shotcrete desde una planta ubicada dentro de la mina hasta las zonas de trabajo.

Figura 14

Esquema de transporte del shotcrete



Fuente: "Elaboración propia"

Se presenta una alternativa novedosa, utilizada hasta ahora únicamente en Norteamérica y África. Esta consiste en instalar una planta de concreto en superficie, desde donde, mediante tuberías y un sistema de bombeo, el concreto se transporta hacia un tanque de remezclado ubicado en el interior de la mina. Allí, la mezcla recupera las propiedades que pudo haber perdido debido al incremento de temperatura y luego se distribuye nuevamente a los mixers que suministran concreto a las distintas labores.

Según Aronowitz y Steward, el éxito del método se fundamenta en dos aspectos principales:

- El uso de aditivos superplastificantes en el diseño del concreto. Este concreto es transportado mediante caída libre a través de un sistema de tuberías verticales. La

fricción generada durante el descenso puede provocar una reducción del slump de hasta un 30% en trayectos de hasta 700 metros. Aquí, la acción del aditivo desempeña un papel crucial al minimizar esta pérdida y garantizar una mezcla con buena trabajabilidad.

- La implementación de tuberías de acero previamente tensadas. Estas tuberías están diseñadas para soportar ciclos intermitentes de compresión y tensión, lo que asegura la sostenibilidad y la eficiencia del proceso operativo.

Inversión:

Las inversiones más significativas corresponden a la compra de una planta de concreto y a la edificación de la infraestructura subterránea necesaria para su operación, específicamente:

Tabla 16

Costos de inversión – alternativa C

Adquisición Planta de concreto	US\$180.000
Obras mecánicas y civiles	US\$ 120.000
Adquisición equipos menores (tornillos de alimentación, sopladores)	US\$ 50.000
Implementación laboratorio	US\$ 80.000
Perforación piloto Raise Borer	US\$150.000
Adquisición moto-hormigonera	US\$ 90.000
Preparación sedimentador en mina	US\$ 20.000
Adquisición tubería de acero	US\$340.000
Inversión total	US\$ 1.030.000

Fuente: Elaboración propia

Costos operativos por metro cúbico:

Tabla 17

Costos operativos – alternativa C

Elaboración del concreto	US\$152,00
Lanzado	US\$ 55,00
Transporte en mixer (con una distancia promedio a la labor de 1,5 km)	US\$ 33,00
Total, por metro cubico	US\$ 240,00

Fuente: Elaboración propia

Ventajas

- El CAPEX se encuentra en un nivel intermedio en comparación con las dos alternativas previas.
- La reducción de la flota de camiones mixer puede alcanzar hasta un 50% en relación con la primera alternativa, lo que implica menores costos de mantenimiento y una disminución en la emisión de gases diésel dentro de la mina.
- Los costos operativos son más bajos que en las opciones anteriores. Aunque el uso del aditivo superplastificante incrementa el costo de elaboración, este se compensa con una menor necesidad de aditivo estabilizante para las zonas cercanas, además de eliminarse el gasto adicional asociado al transporte de cemento en volquetes.
- En el interior de la mina, se requiere un espacio mínimo, limitándose a una cámara destinada al tanque de descarga y mezclado.
- El uso de tuberías para el suministro de concreto aprovecha principalmente la energía potencial gravitatoria, lo que lo convierte en un método eficiente y económico de transporte.

Desventajas

- La incorporación de un superplastificante podría incrementar los costos variables asociados a la producción del concreto.
- El desarrollo de la infraestructura necesaria para la operación resulta un proceso lento, ya que incluye la preparación de la chimenea **Raise Borer** y la instalación de tuberías.
- Es indispensable contar con un encargado exclusivo en interior mina para gestionar la recepción y el despacho.
- En el Perú, existe una limitada disponibilidad de personal capacitado y con experiencia en la instalación de tuberías pretensadas.

4.2 Análisis Económico

Para el análisis se han tomado en cuenta los siguientes aspectos:

- Un costo financiero anual del 10%.
- Una vida útil de 5 años, la cual es similar para las tres alternativas consideradas.

La Figura 15 presenta una comparación económica entre las tres opciones evaluadas.

Figura 15

Análisis económico comparativo

	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
	Panta de shotcrete en superficie Transporte en mixers	Panta de shotcrete en interior mina Transporte en mixers	Panta de shotcrete en superficie Transporte por tuberías
Producción mensual de shotcrete (m3)	4,950.0	4,950.0	4,950.0
Capex	440,000.0	1,310,000.0	1,030,000.0
Opex (US\$/m3 de shotcrete)	280.0	256.0	240.0
Costo mensual de producción (US\$)	1,386,000.0	1,267,200.0	1,188,000.0
Costo anual de producción (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Tasa de intereses (%)	10.0	10.0	10.0
Vida útil estimada (años)	5.0	5.0	5.0
Valor Actual Neto (US\$)	62,608,365.5	56,334,219.9	53,011,456.2
Tasa Interna de Retorno (%)	37.8	11.6	13.8
CAUE (5, 10%) (US\$)	16,515,929.1	14,860,825.3	13,984,288.6

	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
	Planta de shotcrete en superficie Transporte en mixers	Planta de shotcrete en interior mina Transporte en mixers	Planta de shotcrete en superficie Transporte por tuberías
VAN > 0	Cumple	Cumple	Cumple
TIR > 0	Cumple	Cumple	Cumple
TIR > r	Cumple	Cumple	Cumple
CAUE			Cumple

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla, la opción más económica es el transporte del shotcrete mediante tuberías, ya que presenta un menor Costo Unitario de Explotación (CAUE).

$$0 < VAN_C < VAN_B < VAN_A$$

- VAN > 0:

Si el valor actualizado de los ingresos y egresos futuros de la inversión, descontado a la tasa elegida, es mayor que cero, el proyecto generará beneficios.

- VAN = 0:

El proyecto no generará ni ganancias ni pérdidas, por lo que su viabilidad sería neutra en principio.

- VAN < 0:

Si el valor actualizado es negativo, el proyecto causará pérdidas, por lo que debería ser descartado.

$$r < TIR_B < TIR_C < TIR_A$$

- $TIR > 0$:

El proyecto es viable, ya que su rentabilidad es superior a la rentabilidad mínima requerida o al costo de oportunidad.

- $TIR < 0$:

El proyecto debe ser rechazado, ya que la rentabilidad es inferior a la rentabilidad mínima exigida.

- $TIR = 0$:

En este caso, la decisión es indiferente, ya que no se obtiene ni ganancia ni pérdida. Si la TIR es igual a cero o muy cercana, es necesario considerar otros beneficios que el proyecto pueda generar. En este escenario, la rentabilidad neta del proyecto se calculará como la diferencia entre la TIR y el costo del préstamo ($TIR - r$).

- Si $TIR > r$:

El proyecto es aceptado, ya que la rentabilidad supera el costo del capital prestado.

- Si $TIR < r$:

El proyecto se rechaza, ya que la rentabilidad no cubre el costo del préstamo.

- Si $TIR = r$:

En este caso, se deben evaluar otros factores, ya que no se obtiene ni ganancia ni pérdida.

$$CAUE_C < CAUE_B < CAUE_A$$

La selección se realiza en función del CAUE, eligiendo la opción con el costo más bajo como la más conveniente. Es claro que los factores no cuantificables deben ser considerados antes de tomar una decisión final, aunque generalmente se optará por la alternativa con el CAUE más bajo.

Conclusiones

El éxito en la implementación del concreto lanzado o shotcrete depende de varios factores: (a) una correcta selección y control de calidad de los materiales, (b) que la planta de concreto y los equipos de transporte (mixers) y lanzamiento se encuentren en óptimas condiciones, lo cual se logra mediante un programa de mantenimiento preventivo eficiente, (c) que los servicios dentro de la mina, como la presión y el flujo de aire, estén en condiciones adecuadas, y (d) que el personal sea competente, con la habilidad y técnica necesarias.

Los principales inconvenientes de transportar mixers desde la superficie incluyen: (a) el aumento de los costos variables de transporte conforme la operación se profundiza, y (b) la disminución de la eficiencia de los mixers debido al incremento de distancias, lo que reduce el número de viajes por turno y obliga a aumentar la flota.

Los costos asociados a la elaboración y lanzamiento de concreto incluyen un componente fijo: el costo de la planta y los equipos. Este costo puede reducirse si la utilización de la planta se acerca más a su capacidad instalada (240 \$/m³).

Los costos variables para la producción de concreto están principalmente determinados por los insumos, siendo los más significativos en la elaboración de un metro cúbico: (a) el cemento, (b) el aditivo acelerante y (c) la fibra. La clave para reducir estos costos reside en mejorar el diseño del shotcrete.

Bajo condiciones de distancia similares, el transporte del shotcrete a través de tuberías resulta ser la mejor opción desde el punto de vista económico (con un costo alternativo de 13,984,288.6 \$), ambiental y operativo. Sin embargo, antes de implementar esta opción, es necesario evaluar las características específicas de cada mina para tomar la decisión más adecuada.

La instalación de una planta de concreto dentro de la mina implica trasladar un problema logístico de la superficie al interior, donde las condiciones de ventilación son

menores y el espacio disponible para operaciones logísticas es limitado. No es una opción recomendable para producciones de concreto a gran escala.

Recomendaciones

Se recomienda cumplir con el programa de mantenimiento de los equipos (planta, mixers, tuberías) con la finalidad de garantizar una mejor disponibilidad mecánica en la operación.

Definir una zona estratégica central de las operaciones para la construcción de las chimeneas Raise Boring.

Mejorar en las coordinaciones para evitar desperdicio y pérdida del shotcrete transportado a las labores.

Referencias bibliográficas

- Bardales Sanchez, Jimmy (2015) "*Tecnología aplicada para reducción de fragua del concreto lanzado en mina Chungar*".
- Barreda Gonzales, Rodrigo (2014) "*Diseño de planta subterránea para optimizar y reducir costos en mina Chipmo Cia de Minas Buenaventura*".
- Erasmus, W.P. (2013) "*Shotcrete lining of south deep shafts*".
- Hess Group (2020) "*Maquinaria para la fabricación de productos de concreto*".
- León Cervantes, Gersón (2021) "*Optimización de la logística del concreto en operaciones subterráneas*".
- R. Bradley - D. Aronowitz (2018) "*The design of a suspended concrete transport pipeline system*".
- Van Loggerenberg (2016) "*The design of a concrete transport system on Cullinan Diamond Mine*".

Anexos

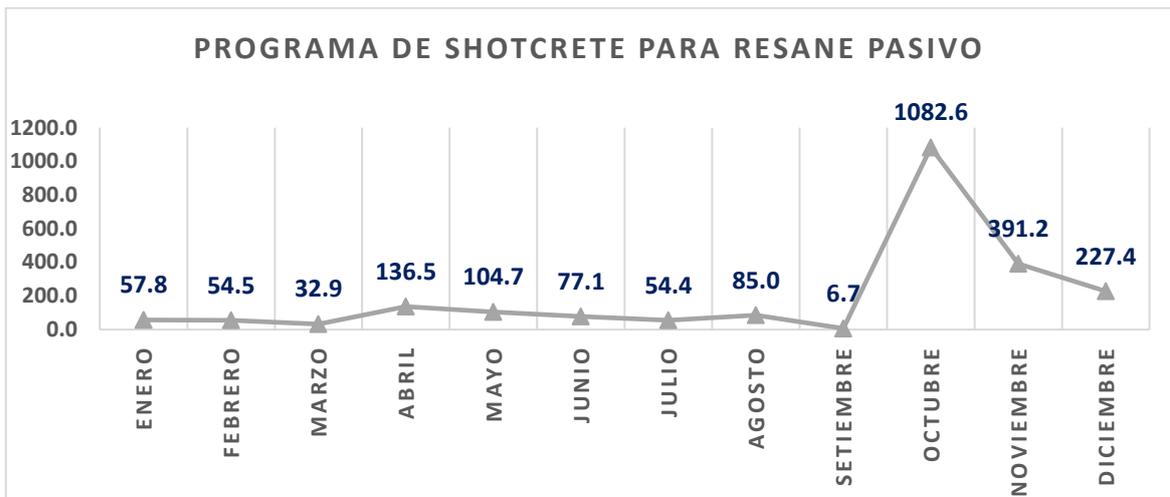
	Pág.
Anexo 1: Programa de shotcrete para resane operativo	1
Anexo 2: Programa de shotcrete para resane pasivo.....	2
Anexo 3: Programa de shotcrete para mortero	3
Anexo 4: Programa de shotcrete desechado	4
Anexo 5: Resultados de rotura a Compresión de probetas con fibra sintética.....	5
Anexo 6: Tendencia de resultados de resistencia con fibra sintética.....	5
Anexo 7: Resultados de rotura a compresión de probetas con fibra metálica.	6
Anexo 8: Tendencia de resultados de resistencia con fibra metálica.	7
Anexo 9: Cálculo del VAN, TIR y CAUE.....	8
Anexo 10: Fórmula para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN)	10
Anexo 11: Fórmula para el cálculo del Costo Anual Equivalente o Beneficio Anual Equivalente (CAUE O BAUE)	11

Anexo 1: Programa de shotcrete para resane operativo



Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Programa de shotcrete para resane pasivo



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Programa de shotcrete para mortero



Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Programa de shotcrete desechado



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Resultados de rotura a Compresión de probetas con fibra sintética.

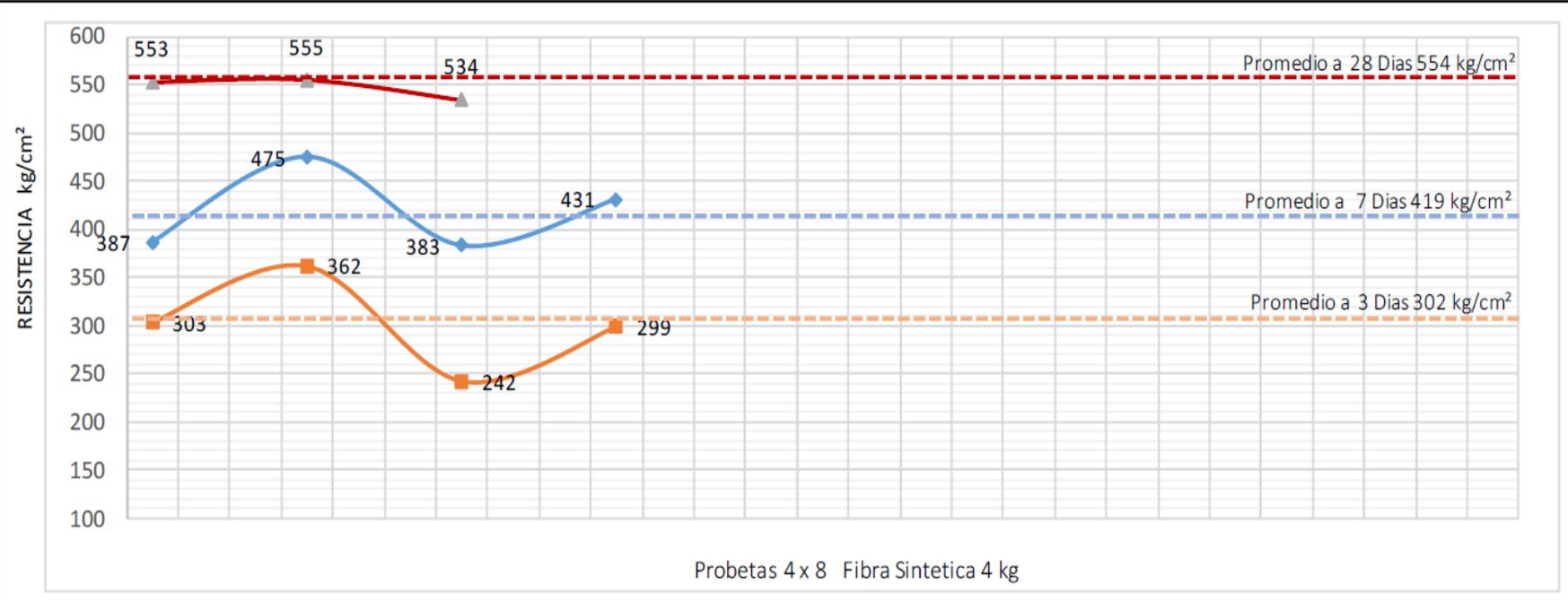
DISEÑO DE SHOTCRETE VIA HUMEDA f_c 300 kg/cm ²																			
RESISTENCIAS A LA COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS 4 X 8 _ Fibra Sintetica 4 Kg											ASTM C 39			VOLCAN					
Cod. Diseño	Zona/Labor	Fecha Muestreo	Fecha Rotura	Edad Dias	Edad Dias	Edad Dias	Altura (cm)	Diametro (cm)	Area (cm ²)	Carga (kg) 03 Dias	Res. (kg/cm ²) 03 dias	Res. Promedio (kg/cm ²) 03 Dias	Carga (kg) 07 Dias	Res. (kg/cm ²) 07 Dias	Res. Promedio (kg/cm ²) 07 Dias	Carga (kg) 28 Dias	Resistencia (kg/cm ²) 28 Dias	Resistencia Promedio (kg/cm ²) 28 Dias	Shotcrete Estandar
1300SHCF54	SC_NV 500 SN_315_2W/AC_79_2E	02/11/2018	05/11/2018	3	7	28	20.2	10.1	80	24,900	311	303	29,294	366	387	44,550	557	553	Shotcrete Fibra Sintetica 4 kg
			09/11/2018				20.2	10.1	80	24,045	301		31,920	399		44,328	554		
			30/11/2018				20.2	10.1	80	23,808	298		31,600	395		43,768	547		
1300SHCF54	SC_NV 780 TJ_80W_21	08/11/2018	11/11/2018	3	7	28	20.2	10.1	80	29,174	365	362	37,780	472	475	44,125	552	555	Shotcrete Fibra Sintetica 4 kg
			15/11/2018				20.2	10.1	80	29,171	365		38,040	476		43,874	548		
			06/12/2018				20.2	10.1	80	28,615	358		38,153	477		45,210	565		
1300SHCF54	SC_NV 780 SN_315_2E/AC_79_2E	22/12/2018	25/12/2018	3	7	28	20.2	10.1	80	20,116	251	242	31,314	391	383	42,711	534	534	Shotcrete Fibra Sintetica 4 kg
			29/12/2018				20.2	10.1	80	19,361	242		30,100	376		42,787	535		
			19/01/2019				20.2	10.1	80	18,563	232		30,586	382		42,709	534		
1300SHCF54	SC_NV 780 TJ3214	09/01/2019	12/01/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	24,113	301	299	34,434	430	431				Shotcrete Fibra Sintetica 4 kg
			16/01/2019				20.2	10.1	80	23,894	299		34,875	436					
			06/02/2019				20.2	10.1	80	23,775	297		34,214	428					
										Ds	45	% a 3 dias	Ds	40	% a 7 dias	Ds	11	% a 28 dias	
										X _{prom}	302	101%	X _{prom}	419	140%	X _{prom}	554	185%	
										Cv	14.9		Cv	9.5		Cv	2		
										F'c <	232	77%	F'c <	366	122%	F'c <	534	178%	
										F'c >	365	122%	F'c >	477	159%	F'c >	565	188%	

Fuente: Egoavil, Alfaro (2018) "Informe de Calidad"

Anexo 6: Tendencia de resultados de resistencia con fibra sintética.



SHOTCRETE VIA HUMEDA f_c 300 kg/cm²_Fibra Sintetica 4 Kg.
RESUMEN ESTADISTICO DE RESISTENCIAS 03, 07 y 28 DIAS



Fuente: Egoavil, Alfaro (2018) "Informe de Calidad"

Anexo 7: Resultados de rotura a compresión de probetas con fibra metálica.



DISEÑO DE SHOTCRETE VIA HUMEDA f_c 300 kg/cm²

RESISTENCIAS A LA COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS 4 X 8 _Fibra Metalica 30 kg/m3 A S T M C 39



Cod. Diseño	Zona/Labor	Fecha Muestreo	Fecha Rotura	Edad Dias	Edad Dias	Edad Dias	Altura (cm)	Diametro (cm)	Area (cm ²)	Carga (kg) 03 Dias	Resistencia (kg/cm ²) 03 dias	Resistencia Promedio (kg/cm ²) 03 Dias	Carga (kg) 07 Dias	Resistencia (kg/cm ²) 07 Dias	Resistencia Promedio (kg/cm ²) 07 Dias	Carga (kg) 28 Dias	Resistencia (kg/cm ²) 28 Dias	Resistencia Promedio (kg/cm ²) 28 Dias	Shotcrete Estandar
1300SHCFM30	SC_NV 1320CA_01_616_1/XC_616-1	25/11/2018	28/11/2018	3	7	28	20.2	10.1	80	24,676	308	320	31,926	399	397	47,913	599	591	Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			02/12/2018				20.2	10.1	80	26,910	336		30,809	385		46,633	583		
			23/12/2018				20.2	10.1	80	25,125	314		32,480	406		47,254	591		
1300SHCFM30	NV 1270 SN_76_2E	01/12/2019	04/12/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	28,431	355	338	35,441	443	451	48,412	605	615	Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			08/12/2019				20.2	10.1	80	26,116	326		36,209	453		51,080	639		
			29/12/2019				20.2	10.1	80	26,603	333		36,503	456		48,136	602		
1300SHCFM30	NV 1270 CA_02_703_8/XC_703_8	04/12/2019	07/12/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	28,501	356	352	35,412	443	437	52,453	656	650	Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			11/12/2019				20.2	10.1	80	27,892	349		34,265	428		50,567	632		
			01/01/2020				20.2	10.1	80	28,104	351		35,223	440		52,940	662		
1300SHCFM30	NV 1320 SN_66_1E/AC_66_1E	21/12/2019	24/12/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	24,850	311	314	32,558	407	390	44,034	550	557	Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			28/12/2019				20.2	10.1	80	25,332	317		30,165	377		45,332	567		
			18/01/2020				20.2	10.1	80	25,189	315		30,887	386		44,407	555		
1300SHCFM30	NV 1320 SN_75_2E/AC_75_2W	06/01/2019	09/01/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	26,483	331	335	32,619	408	400				Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			13/01/2019				20.2	10.1	80	27,108	339		31,543	394					
			03/02/2019				20.2	10.1	80	26,851	336		31,894	399					
1300SHCFM30	NV 1270 SN_76_4E	07/01/2019	10/01/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	27,441	343	347	35,439	443	443				Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			14/01/2019				20.2	10.1	80	28,003	350		34,983	437					
			04/02/2019				20.2	10.1	80	27,831	348		35,785	447					
1300SHCFM30	NV 1320 SN_66_1W/AC_66_1E	08/02/2019	11/02/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	26,370	330	325	36,283	454	452				Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			15/02/2019				20.2	10.1	80	25,493	319		36,194	452					
			08/03/2019				20.2	10.1	80	26,182	327		36,002	450					
1300SHCFM30	NV 1320 CA_02_1320/RP_1320W	12/01/2019	15/01/2019	3	7	28	20.2	10.1	80	23,398	292	297	32,389	405	417				Shotcrete Fibra Metalica 30 Kg
			19/01/2019				20.2	10.1	80	24,326	304		33,594	420					
			09/02/2019				20.2	10.1	80	23,490	294		34,185	427					
										Ds	21	% a 3 dias	Ds	25	% a 7 dias	Ds	37	% a 28 dias	
										X _{prom}	324	108%	X _{prom}	423	141%	X _{prom}	603	201%	
										Cv	6.3		Cv	6.0		Cv	6.2		
										F _c <	283	94%	F _c <	377	126%	F _c <	550	183%	
										F _c >	356	119%	F _c >	456	152%	F _c >	662	221%	

Fuente: Egoavil, Alfaro (2019) "Informe de Calidad"

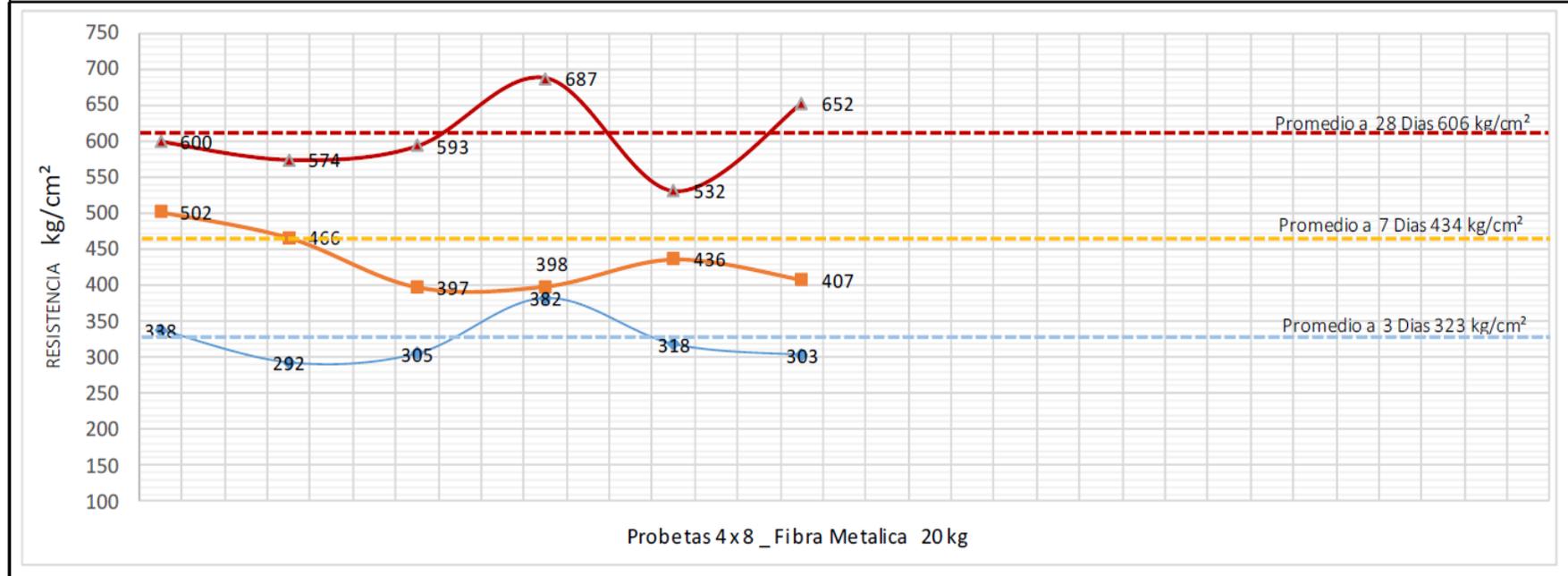
Anexo 8: Tendencia de resultados de resistencia con fibra metálica.



SHOTCRETE VIA HUMEDA f_c 300 kg/cm² _Fibra Metalica 20 Kg.

RESUMEN ESTADISTICO DE RESISTENCIAS 03 - 07 - 28 DIAS

ASTM C 39



Fuente: Egoavil, Alfaro (2018) "Informe de Calidad"

Anexo 9: Cálculo del VAN, TIR y CAUE.

	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
	Panta de shotcrete en superficie Transporte en mixers	Panta de shotcrete en interior mina Transporte en mixers	Panta de shotcrete en superficie Transporte por tuberías
Año 0 (US\$)	-440,000.0	-1,310,000.0	-1,030,000.0
Año 1 (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Año 2 (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Año 3 (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Año 4 (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Año 5 (US\$)	16,632,000.0	15,206,400.0	14,256,000.0
Valor Actual Neto (US\$)	62,608,365.5	56,334,219.9	53,011,456.2
Tasa Interna de Retorno (%)	37.8	11.6	13.8
CAUE (5, 10%) (US\$)	16,515,929.1	14,860,825.3	13,984,288.6

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10: Fórmula para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Fuente: Gala, Fernando (2020) "Formulación y evaluación de proyectos mineros"

Anexo 11: Fórmula para el cálculo del Costo Anual Equivalente o Beneficio Anual Equivalente (CAUE O BAUE)

$$\text{CAUE o BAUE} = \text{VAN} * \frac{(1 + i)^n * i}{(1 + i)^n - 1}$$

Fuente: Gala, Fernando (2020) "Formulación y evaluación de proyectos mineros"