

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

**Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete con
el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los
costos operativos de la Unidad Minera Inmaculada,
Ayacucho, 2025.**

**Para optar el título profesional de:
INGENIERO DE MINAS**

**PRESENTADO POR:
Bach. Daniel GUTIERREZ BARZOLA**

**ASESOR:
MBA. Leonil Fernando QUISPE ARONES**

AYACUCHO - PERÚ

2026

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS.....	vii
DEDICATORIA.....	ix
AGRADECIMIENTO.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1. Problema general	17
1.2.2. Problema específico.....	17
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivo específico.....	18
1.4. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS.....	18
1.4.1. Hipótesis general	18
1.4.2. Hipótesis específico	19
1.5. VARIABLES E INDICADORES.....	19
1.6. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES	20
1.7. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DEL PROYECTO	21
1.7.1. Justificación	21
1.7.2. Importancia.....	22
1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES	23
1.8.1. Alcance.....	23
1.8.2. Limitaciones.....	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	25

2.1.	GENERALIDADES	25
2.1.1.	Ubicación del proyecto.....	25
2.1.2.	Accesibilidad.....	26
2.1.3.	Clima	27
2.1.4.	Marco geológico regional y estructural.....	28
2.1.5.	Geología regional de la zona	30
2.1.6.	Mineralización y alteración.....	35
2.1.7.	Geología local de la zona (zona Angela y Barbara)	35
2.2.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	36
2.2.1.	Antecedentes Internacionales.....	36
2.2.2.	Antecedentes Nacionales	39
2.2.3.	Antecedentes locales.....	41
2.3.	BASES TEÓRICAS.....	43
2.4.	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA TEMPRANA DEL SHOTCRETE CON EL USO DEL ADITIVO MR-193 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS.	45
2.5.	ADITIVOS.....	54
2.6.	ADITIVOS INCORPORADOS EN EL DISEÑO DE SHOTCRETE EN LA UNIDAD MINERA INMACULADA	59
2.7.	DISEÑO DE SHOTCRETE	61
2.7.1.	Principales propiedades del shotcrete	62
2.7.2.	Resistencia temprana del shotcrete en UM Inmaculada.....	65
2.8.	COSTOS OPERATIVOS EN LA MINERÍA.....	70
2.9.	DEFINICION DE TÉRMINOS	72
	CAPITULO III: METODOLOGÍA	76
3.1.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	76
3.2.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	77
3.2.1.	Tipo de investigación	77
3.2.2.	Nivel de investigación	77

3.3.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	78
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA	79
3.5.	TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	80
3.6.	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	80
3.7.	ASPECTOS ÉTICOS	81
3.8.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	81
3.8.1.	Condiciones técnicas y control de calidad de los materiales para el diseño.	81
3.8.2.	Evaluación de costos de sostenimiento del shotcrete con MR-193	90
3.8.3.	Procedimiento para la determinación del incremento de resistencia temprana	94
3.8.4.	Determinación del tiempo optimo de reingreso seguro al frente de trabajo	106
3.8.5.	Procedimiento para cálculo del tiempo óptimo de reingreso seguro mediante interpolación lineal	107
3.8.6.	Diseño de shotcrete con aditivo MR-193.....	110
	CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	119
4.1.	RESULATADOS	119
4.1.1.	Resultados de resistencia temprana del shotcrete con MR-193.....	119
4.1.2.	Determinación del tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo	120
4.1.3.	Diseño de shotcrete	121
4.2.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	122
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	125
	CONCLUSIONES.....	129
	RECOMENDACIONES.....	131
	Referencias bibliográficas	133
	ANEXOS	135

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Situación de reingreso temprano de otras minas del Perú.....	16
Figura 2. Ubicación geográfica de la Unidad Minera Inmaculada.....	26
Figura 3. Condición climática entre noviembre a marzo de la unidad minera Inmaculada.	28
Figura 4. Ubicación del proyecto Inmaculada en la franja metalogénica epitermal del vulcanismo Cenozoico del sur del Perú.....	29
Figura 5. Geología regional de la Unidad Minera Inmaculada.	34
Figura 6. Roca debris Flow que es de la zona Angela y la andesita de la zona Barbara.....	36
Figura 7. Elementos de sostenimiento.....	45
Figura 8. Cabezal proyector de shotcrete vía húmeda.	46
Figura 9. Especificación para ensayos de agregados fino (Gradación N°2).	52
Figura 10. Clases de resistencia temprana del hormigon proyectado.	66
Figura 11. Desarrollo de la resistencia del shotcrete.	67
Figura 12. Métodos de medición de la resistencia temprana.	67
Figura 13. Penetrómetro Proctor.	68
Figura 14. Rango operativo habitual de las técnicas de medición.	69
Figura 15. Pistola de clavos accionado por pólvora HILTI DX 450.	70
Figura 16. Curva granulométrica de la prueba dentro de los límites.	84
Figura 17. Agregado de Sorani variación en la granulometría y malla #200.....	86
Figura 18. Porcentaje de humedad de la arena de noche y día.	87
Figura 19. Porcentaje de absorción y gravedad especifica del agregado.	88
Figura 20. Desarrollo de resistencia del shotcrete.....	96
Figura 21. Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete a las 2 y 4 horas.....	99
Figura 22. Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete a las 2.5 horas y 4.5 horas.....	102
Figura 23. Clases de resistencia temprana alcanzada del hormigón proyectado en las tres pruebas.	103
Figura 24. Resistencias finales del concreto proyectado.	105
Figura 25. Curvas resistencia vs tiempo.	107

Figura 26. Tiempo óptimo de reingreso por frente.....	110
Figura 27. Distribución de costos en la elaboración de 1m ³ de shotcrete.....	117
Figura 29. Tiempo óptimo de reingreso al frente con MR-193.	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Operacionalización de variables.</i>	20
Tabla 2. <i>Límites de clasificación para agregados combinados.</i>	51
Tabla 3. <i>Tipos de gradación del agregado.</i>	52
Tabla 4. <i>Límites de clasificación para agregados combinados.</i>	58
Tabla 5. <i>Límites de clasificación para agregados combinados.</i>	61
Tabla 6. <i>Ensayo de granulometría.</i>	83
Tabla 7. <i>Porcentaje pasante de las malla N°200 y Modulo de fineza.</i>	85
Tabla 8. <i>Características físicas del shotcrete en estado fresco.</i>	89
Tabla 9. <i>Costo unitario de shotcrete con aditivo MR-160 y MR-193 (US\$/m³).</i>	90
Tabla 10. <i>Participación porcentual de los componentes del costo del shotcrete con MR-193.</i> ..	91
Tabla 11. <i>Comparación del costo por metro de avance: MR-160 vs MR-193. (Sección típica 4.0 × 4.0 m; consumo de shotcrete = 1.12 m³/m).</i>	92
Tabla 12. <i>Reducción de sostenimiento secundario por metro de avance asociada al uso del MR-193.</i>	93
Tabla 13. <i>Balance económico neto por metro de avance asociado al uso del MR-193.</i>	93
Tabla 13. <i>Pruebas realizadas con el Penetrómetro Proctor.</i>	95
Tabla 14. <i>Ensayo realizado en el panel con pistola Hilty.</i>	95
Tabla 15. <i>Pruebas realizadas en el panel con el penetrómetro Proctor.</i>	97
Tabla 16. <i>Pruebas realizadas en el panel haciendo uso de la pistola Hilty.</i>	98
Tabla 17. <i>Pruebas realizadas en el panel con el penetrómetro Proctor.</i>	100
Tabla 18. <i>Pruebas realizadas en el panel con la pistola Hilty.</i>	101
Tabla 19. <i>Ensayo de resistencias finales realizada a las tres pruebas.</i>	104
Tabla 21. <i>Desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 según método de ensayo.</i>	106
Tabla 22. <i>Resumen del desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 según método de ensayo.</i>	109

Tabla 20. <i>Re Diseño de mezcla de shotcrete con aditivo MR-193 (420 kg de cemento) dosificación de aditivos.</i>	111
Tabla 21. <i>Materiales y cantidades.</i>	111
Tabla 22. <i>Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².</i>	113
Tabla 23. <i>Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².</i>	114
Tabla 24. <i>Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².</i>	115
Tabla 25. <i>Costo de shotcrete diseño $F'c=280$ kg/cm².</i>	116
Tabla 26. <i>Balance económico neto por metro de avance asociado al uso del MR-193.</i>	120
<i>Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².</i>	121
Tabla 30. <i>Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk) para la resistencia temprana del shotcrete.</i> .	123
Tabla 31. <i>Prueba de Kruskal–Wallis para la resistencia temprana del shotcrete.</i>	123
Tabla 32. <i>Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk) para la resistencia temprana del shotcrete.</i> .	124
Tabla 33. <i>Prueba de Kruskal–Wallis para el tiempo de reingreso.</i>	124
Tabla 34. <i>Prueba de Kruskal–Wallis para el costo total por metro de avance.</i>	125

DEDICATORIA

A mis padres, Modesto y Casimira: A mi padre que cada vez que despertaba a las cuatro de la mañana y alzaba la mirada al cielo, titilabas en el vasto cosmos, en señal de que siempre estarás conmigo. A mi madre cuyo esfuerzo infinito y amor incondicional sostienen cada sueño que anhelo alcanzar.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la empresa “Operaciones Seprocal S.A.C” por haberme brindado la oportunidad de crecer y desarrollarme profesionalmente. La confianza y el apoyo que me dieron fueron fundamentales para el crecimiento y logro de objetivos. A mis jefes y compañeros de trabajo les expreso mi gratitud por su generosidad al compartir su conocimiento y experiencia.

A mis asesores cuya sabiduría y perspicacia guiaron mi pluma, su apoyo constante y orientación han sido invaluable para mí.

A mi familia gracias por sus apoyo y paciencia, sin cuya presencia este logro no habría visto la luz.

RESUMEN

La presente investigación se desarrolla en el contexto de la minería subterránea, donde el sostenimiento con shotcrete constituye un elemento crítico para la seguridad, la continuidad operacional y el control de costos. El objetivo general del estudio fue evaluar la resistencia temprana del shotcrete mediante el uso del aditivo MR-193 y su contribución a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento en la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho – 2025. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño experimental, comparando un sistema patrón con aditivo MR-160 frente a un sistema optimizado con MR-193. La población estuvo conformada por frentes de trabajo sostenidos con shotcrete, empleándose como instrumentos ensayos de resistencia temprana, registros operativos de tiempo de reingreso y análisis de costos operativos. Los procedimientos incluyeron la evaluación experimental de la resistencia a edades tempranas, el análisis estadístico mediante pruebas de hipótesis y la comparación económica integral del sistema de sostenimiento. Los resultados evidenciaron que el uso del aditivo MR-193 incrementó la resistencia temprana del shotcrete entre 35 % y 60 %, redujo el tiempo de reingreso seguro aproximadamente en un 50 % y permitió una disminución del costo total del sostenimiento por metro de avance entre 15 % y 25 %, a pesar de un incremento del costo unitario del shotcrete. Se concluye que el uso del aditivo MR-193 optimiza el desempeño técnico y económico del sostenimiento, contribuyendo a una operación más segura, eficiente y rentable.

Palabras clave: *shotcrete, resistencia temprana, sostenimiento minero, optimización de costos, reingreso seguro.*

ABSTRACT

This research is conducted within the context of underground mining, where shotcrete support is a critical element for safety, operational continuity, and cost control. The general objective of the study was to evaluate the early-age strength of shotcrete using the MR-193 additive and its contribution to the optimization of operating costs associated with ground support at the Inmaculada Mining Unit, Ayacucho – 2025. The research was applied in nature, with a quantitative approach, explanatory level, and a quasi-experimental design, comparing a baseline system using the MR-160 additive with an optimized system using MR-193. The population consisted of working faces supported with shotcrete, and the instruments included early-age strength tests, operational records of re-entry time, and operating cost analyses. The procedures involved experimental evaluation of early-age strength, statistical analysis through hypothesis testing, and a comprehensive economic comparison of the support system. The results showed that the use of the MR-193 additive increased early-age shotcrete strength by approximately 35% to 60%, reduced safe re-entry time by about 50%, and achieved a reduction in total ground support cost per meter of advance ranging from 15% to 25%, despite an increase in the unit cost of shotcrete. It is concluded that the use of the MR-193 additive optimizes the technical and economic performance of ground support, contributing to a safer, more efficient, and more profitable underground mining operation.

Keywords: *shotcrete, early-age strength, ground support, cost optimization, safe re-entry.*

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA

En la minería subterránea moderna, el shotcrete constituye uno de los sistemas de sostenimiento primario más utilizados debido a su capacidad de proporcionar estabilidad temprana al macizo rocoso, mejorar la seguridad operacional y permitir la continuidad del ciclo de minado. En este contexto, la resistencia temprana a la compresión del shotcrete es un parámetro crítico, ya que condiciona directamente los tiempos de reingreso al frente de trabajo, la secuencia de perforación y sostenimiento, y, en consecuencia, los costos operativos asociados al uso de equipos y mano de obra (ACI Committee 506, 2016; EFNARC, 2007).

A nivel mundial, diversos estudios coinciden en que una ganancia insuficiente o altamente variable de resistencia temprana incrementa los tiempos de espera operativa y eleva los riesgos geotécnicos durante las primeras horas posteriores a la aplicación del shotcrete. Investigaciones experimentales han demostrado que la resistencia inicial del shotcrete puede variar significativamente en función del tipo de acelerante, la dosificación, las condiciones ambientales y el método de aplicación, lo que dificulta la definición de criterios universales de reingreso seguro (Bernard, 2014; Austin et al., 2004). Como respuesta a esta problemática, en las últimas dos

décadas se ha impulsado el desarrollo de acelerantes libres de álcalis capaces de mejorar la resistencia temprana sin comprometer la resistencia final ni la durabilidad del sostenimiento.

En América Latina, el uso de shotcrete como sostenimiento primario se ha consolidado en proyectos de túneles y minería subterránea; sin embargo, la literatura regional evidencia una alta heterogeneidad en los criterios de desempeño temprano y reingreso operativo. Estudios técnicos reportan que algunas operaciones permiten el reingreso con resistencias cercanas a 1,0 MPa, mientras que otras exigen valores superiores a 2,0 o 3,0 MPa, dependiendo del criterio local, la experiencia empírica y las condiciones geomecánicas del macizo (Carmona & Molins, 2018). Esta variabilidad revela un vacío de estandarización técnica y una dependencia excesiva de prácticas empíricas, más que de evaluaciones sistemáticas basadas en mediciones de resistencia temprana y análisis de riesgo.

En el contexto peruano, la minería subterránea ha adoptado ampliamente el shotcrete reforzado con fibras y el uso de aditivos acelerantes; no obstante, diversos trabajos académicos y reportes técnicos coinciden en que persisten limitaciones en el control de calidad del desempeño temprano y en la evaluación económica integral de los diseños de sostenimiento. Investigaciones realizadas en minas peruanas muestran que la resistencia temprana del shotcrete está fuertemente influenciada por la calidad de los agregados, la dosificación del acelerante y las condiciones de aplicación, generando dispersiones que afectan tanto la seguridad como la eficiencia operativa (González, 2019; Hidalgo et al., 2020). Asimismo, se evidencia una carencia de estudios que correlacionen directamente la ganancia de resistencia temprana con la optimización cuantificable de los costos operativos.

En la Unidad Minera Inmaculada, hasta mediados del año 2024 se empleó el aditivo acelerante MR-160 en el diseño del shotcrete. Bajo este esquema operativo, el reingreso al frente

de trabajo para actividades de perforación se realiza aproximadamente a las 2 horas, cuando el shotcrete alcanza resistencias cercanas a 2 MPa, y la instalación de pernos se ejecuta alrededor de las 4 horas, al alcanzar aproximadamente 4 MPa. Si bien este criterio cumple con los estándares internos de seguridad, genera tiempos de espera significativos que impactan negativamente en la productividad del ciclo de minado, incrementando los costos asociados a la inactividad de equipos, disponibilidad de personal y extensión del tiempo de sostenimiento por frente.

Figura 1. Situación de reingreso temprano de otras minas del Perú.

Empresa minera	Ubicación	Unidad	Altura	UNE EN 14488-2 Resistencia tempranas a:					
				1.0 hr	2.0 hr	2.5 hr	3.0 hr	4.0 hr	6.0 hr
Compañía Minera Santa Luisa S.A.	Ancash	Huazalá	3950 msnm	-	-	-	1.0 Mpa	-	-
	Ancash	Pallca	3900 msnm	-	-	-	-	-	1.0 Mpa
Compañía Minera Raura S.A.	Huánuco	Raura	4700 msnm	-	-	-	2.0 Mpa	-	-
*Operadores Concentrados Peruanos S.A.C.	Huancavelica	Cobriza	2500 msnm	-	-	-	2.0 Mpa	-	-
Alpayana S.A.	Junín	Morococha/(ex Argentun)	4540 msnm	-	-	-	-	3.5 Mpa	-
	Lima	Americana (Ex Casapalca)	4400 msnm	-	2.0 Mpa	-	-	-	-
Compañía Minera Poderosa S.A.	La Libertad	Santa María	3000 msnm	-	2.0 Mpa	-	-	-	-
	La Libertad	Marañón	1300 msnm	-	-	-	-	3.0 Mpa	-
Minera Aurífera Retamas S.A.	La Libertad	Marsa	3900 msnm	-	-	-	3.0 Mpa	-	-
	Ica	Cerro Lindo	1345 msnm	1 Mpa	-	-	4 Mpa	-	-
Nexa Resources Perú S.A.A.	Pasco	El Porvenir	4200 msnm	-	2 Mpa	-	-	-	-
				-	-	-	4 Mpa	-	-
Cia. Minera Condestable SA	Lima	Condestable	400 msnm	-	1.5 Mpa	-	-	-	-
Sociedad Minera de Santander S.A.S.	Lima	Santander	4650 msnm	-	2.5 Mpa	-	-	-	-
Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Arequipa	Tambomayo	4800 msnm	-	-	-	3.0 Mpa	-	-
	Arequipa	Orcopampa	3800 msnm	-	-	-	2.0 Mpa	-	-
Minera Bateas S.A.C	Arequipa	San Cristobal	4400 msnm	-	-	-	-	1.0 Mpa	-
				-	-	-	3.0 Mpa	-	-
Cia. Minera Ares S.A.C.	Ayacucho	Inmaculada	4800 msnm	-	2.0 Mpa	-	-	4.0 Mpa	-

* Ex Cia Minera Cobriza.

Nota: Adaptado del área de geotecnia de la UM Inmaculada.

Desde una perspectiva de investigación, se identifica que la Unidad Minera Inmaculada no cuenta con una evaluación sistemática del efecto de aditivos acelerantes de nueva generación, como el MR-193, sobre la resistencia temprana del shotcrete en condiciones reales de operación. Si bien la literatura internacional y las fichas técnicas de fabricantes reportan mejoras en la ganancia resistente inicial, existe una brecha entre estos resultados teóricos y su validación en contextos geomecánicos, operativos y económicos específicos. Además, no se dispone de un análisis integrado que relacione la mejora de la resistencia temprana con la reducción de tiempos de reingreso, el incremento del nivel de seguridad y la optimización de los costos operativos.

En este contexto, la presente investigación se plantea como una respuesta directa a dicha problemática, al evaluar la resistencia temprana del shotcrete mediante la implementación del aditivo MR-193, y analizar cómo esta mejora técnica permite reducir los tiempos de reingreso seguro al frente y optimizar los costos operativos asociados a materiales, equipos y mano de obra.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿En qué medida mejora la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos en la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho – 2025?

1.2.2. Problema específico

- ¿De qué manera el incremento de la resistencia temprana del shotcrete, mediante el uso del aditivo MR-193, contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete?
- ¿Cuál es el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo, en función de la resistencia temprana alcanzada por el shotcrete con el uso del aditivo MR-193, para la continuidad del ciclo de minado?
- ¿Cuál es el diseño del shotcrete con el uso del nuevo aditivo MR-193 que permita alcanzar la resistencia temprana requerida para un reingreso seguro y eficiente?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para optimizar los costos operativos de la unidad minera Inmaculada, Ayacucho – 2025.

1.3.2. Objetivo específico

- Evaluar como el incremento de la resistencia temprana del shotcrete, mediante el uso del aditivo MR-193, contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete.
- Determinar el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo, en función de la resistencia temprana alcanzada por el shotcrete con el uso del aditivo MR-193, para la continuidad del ciclo de minado.
- Determinar el diseño del shotcrete con el uso del nuevo aditivo MR-193 que permita alcanzar la resistencia temprana requerida para un reingreso seguro y eficiente.

1.4. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

Mejora la resistencia temprana del shotcrete con el uso de aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad minera inmaculada.

1.4.2. Hipótesis específico

- El uso del aditivo MR-193 incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete, lo que contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete.
- El uso del aditivo MR-193 permite alcanzar la resistencia temprana requerida en un menor tiempo, reduciendo el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo y mejorando la continuidad del ciclo de minado.
- El diseño del shotcrete que incorpora el aditivo MR-193, mediante una dosificación optimizada, permite alcanzar la resistencia temprana necesaria para un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo.

1.5. VARIABLES E INDICADORES

1.5.1 Variable Independiente

Uso del aditivo MR-193 en el diseño del shotcrete.

- Porcentaje de MR-193 (Dosificación %)
- Resistencia a la compresión temprana (MPa)
- Tiempo transcurrido (min)
- Costo (\$)

1.5.2 variable dependiente

Optimización de costos operativos.

- Costo de materia prima (\$)
- Costo por los equipos empleados (\$)
- Costo por personal empleado (\$)

1.6. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Tabla 1. Operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores
Variable independiente: Uso del aditivo MR-193 en el diseño del shotcrete	Es la incorporación controlada de un acelerante al shotcrete para aumentar la resistencia temprana y reducir el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo (ACI, 2023; EFNARC, 2007).	Se evalúa mediante la dosificación del aditivo MR-193 y la medición de la resistencia a la compresión temprana del shotcrete, en función del tiempo de fraguado y del procedimiento de aplicación empleado.	• Dosificación del aditivo • Desempeño mecánico temprano • Desarrollo de resistencia	• Porcentaje de MR-193 (Dosificación %) • Resistencia a la compresión temprana (MPa) • Tiempo transcurrido (min) • Costo (\$)
Variable dependiente: Optimización de los costos operativos	Para GERENS (2023) la optimización de los costos operativos son determinados por la gestión que se realiza con fin de reducir los costos y optimizar los recursos dentro de las actividades que serán realizados para las operaciones dentro de una actividad específica.	Se analiza desde el aumento de la productividad y cumplimiento de programas mensuales en la Unidad Minera Inmaculada.	• Costo por insumos • Costo por equipo • Costo de personal	• Costo de materia prima (\$) • Costo por los equipos empleados (\$) • Costo por personal empleado (\$)

1.7. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DEL PROYECTO

1.7.1. Justificación

La presente investigación se justifica teóricamente porque contribuye al fortalecimiento del conocimiento técnico sobre el comportamiento del shotcrete en edades tempranas, específicamente en relación con el uso de aditivos acelerantes de nueva generación como el MR-193. Si bien la literatura internacional reconoce la importancia de la resistencia temprana para la seguridad y continuidad del ciclo de minado, existe un vacío en estudios aplicados que integren de manera sistemática la dosificación del aditivo, la ganancia de resistencia temprana y su impacto en condiciones reales de minería subterránea. En este sentido, el estudio permitirá validar y contrastar los postulados teóricos propuestos por normas y guías técnicas, aportando evidencia empírica que contribuya a la mejora de los criterios de diseño y control del shotcrete en contextos mineros específicos.

Desde el punto de vista práctico, esta investigación se justifica porque aborda una problemática operativa real de la Unidad Minera Inmaculada, relacionada con los tiempos de espera para el reingreso seguro al frente de trabajo y los costos asociados al sostenimiento con shotcrete. La evaluación del uso del aditivo MR-193 permitirá establecer un diseño optimizado del shotcrete que incremente la resistencia temprana, reduzca los tiempos de reingreso y mejore la eficiencia del ciclo de minado. Los resultados del estudio servirán como herramienta técnica para la toma de decisiones, facilitando la optimización de costos de materiales, equipos y mano de obra, así como la estandarización de procedimientos de aplicación y control de calidad en la operación minera.

La justificación social de esta investigación radica en su contribución a la mejora de las condiciones de seguridad y salud ocupacional del personal que labora en minería subterránea. Al optimizar la resistencia temprana del shotcrete y definir criterios técnicos confiables para el

reingreso seguro al frente de trabajo, se reduce la exposición de los trabajadores a riesgos geotécnicos asociados a desprendimientos de roca, una de las principales causas de accidentes en este tipo de operaciones. Asimismo, el estudio promueve prácticas de sostenimiento más seguras y eficientes, generando beneficios indirectos en la productividad, la estabilidad laboral y la sostenibilidad de la actividad minera, con impacto positivo tanto para la empresa como para la comunidad vinculada a la operación.

1.7.2. Importancia

La presente investigación es importante porque aborda un aspecto crítico del sostenimiento en minería subterránea: la resistencia temprana del shotcrete y su influencia directa en la seguridad, eficiencia operativa y optimización de costos. Al evaluar el uso del aditivo MR-193 en condiciones reales de operación, el estudio permitirá establecer criterios técnicos confiables para el reingreso seguro al frente de trabajo, contribuyendo a la reducción de riesgos geotécnicos y a la mejora de la continuidad del ciclo de minado. Asimismo, la investigación genera información técnica aplicable que puede servir como referencia para el diseño y control del shotcrete en operaciones mineras con condiciones geomecánicas similares, fortaleciendo la toma de decisiones basada en evidencia.

Desde una perspectiva académica y profesional, la investigación es relevante porque integra el análisis técnico, operativo y económico del shotcrete, superando enfoques parciales centrados únicamente en el desempeño mecánico. Los resultados permitirán vincular la ganancia de resistencia temprana con indicadores económicos concretos, como el costo por metro cúbico y la reducción de tiempos muertos, aportando un enfoque integral que puede ser replicado en otras unidades mineras. De este modo, el estudio contribuye al desarrollo de prácticas de sostenimiento más seguras, eficientes y sostenibles, con impacto positivo en la productividad minera y en la protección del capital humano.

1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.8.1. Alcance

El presente estudio comprende la evaluación del desempeño del shotcrete con la incorporación del aditivo MR-193 a partir de ensayos realizados en tres labores específicas de la Unidad Minera Inmaculada, seleccionadas como áreas piloto por sus condiciones representativas de operación. Los resultados obtenidos en dichas labores permitirán analizar el comportamiento de la resistencia temprana, los tiempos de reingreso seguro al frente de trabajo y su impacto en el ciclo de minado, estableciendo criterios técnicos que podrán ser extrapolados progresivamente al resto de las labores de la unidad minera.

Asimismo, el alcance de la investigación incluye el análisis del impacto económico asociado al uso del aditivo MR-193, considerando un periodo aproximado de un año de evaluación de los costos operativos directamente relacionados con el sostenimiento mediante shotcrete, tales como los costos de materia prima, equipos empleados y personal involucrado en la operación. El estudio se limita al análisis de estos costos directos, sin considerar costos indirectos o externos a la operación minera, y se desarrolla bajo las condiciones geomecánicas y operativas propias de la Unidad Minera Inmaculada.

1.8.2. Limitaciones

La presente investigación presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas para la correcta interpretación de los resultados. En primer lugar, el estudio se desarrolla en tres labores específicas de la Unidad Minera Inmaculada, seleccionadas como áreas piloto, por lo que los resultados obtenidos reflejan las condiciones geomecánicas, operativas y ambientales propias de dichas labores y no necesariamente representan la totalidad de escenarios presentes en la unidad minera o en otras operaciones subterráneas.

En segundo lugar, la evaluación de la resistencia temprana del shotcrete se encuentra condicionada por factores operativos no controlables en su totalidad, tales como variaciones en la calidad de los agregados, condiciones de humedad, temperatura ambiental, experiencia del operador y estabilidad del proceso de aplicación. Estas variables pueden generar dispersión en los resultados de los ensayos de resistencia temprana, a pesar de la aplicación de procedimientos de control de calidad.

Asimismo, el análisis de la optimización de los costos operativos se limita a los costos directos asociados al sostenimiento con shotcrete, específicamente materia prima, equipos y mano de obra, sin incluir costos indirectos, costos logísticos adicionales, ni posibles impactos económicos derivados de factores externos a la operación minera. Finalmente, el periodo de análisis económico aproximado de un año puede no capturar variaciones de largo plazo asociadas a cambios en las condiciones del mercado, políticas internas de la empresa o modificaciones en los planes de minado.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES

2.1.1. Ubicación del proyecto

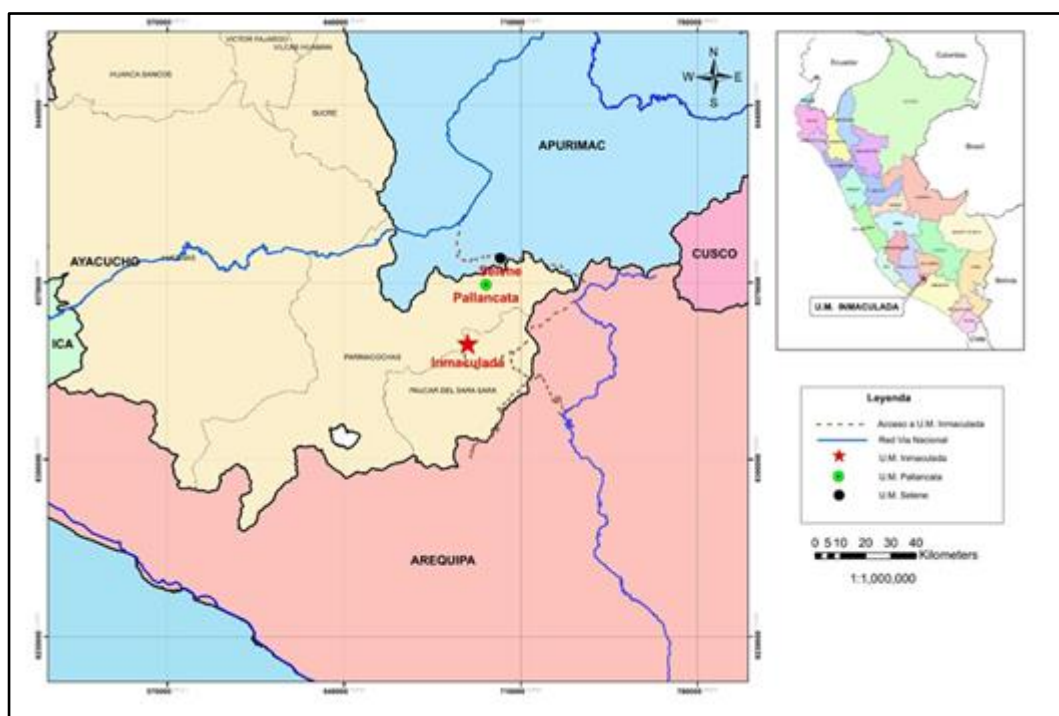
La Unidad Minera Inmaculada se localiza en el sector sur de la región Ayacucho, dentro de la provincia de Paucar del Sara Sara, específicamente en el distrito de Oyolo. Geográficamente, el área del proyecto se sitúa aproximadamente en la latitud 14° 57' 27" Sur y longitud 73° 14' 42" Oeste, en una zona de topografía accidentada característica de la sierra sur del Perú.

El proyecto se emplaza en un entorno de alta montaña, con elevaciones que superan los 4 300 m s.n.m., lo cual condiciona tanto las actividades operativas como logísticas de la unidad minera. La planta de tratamiento se encuentra ubicada a una altitud aproximada de 4 716 m s.n.m., donde además se localizan las principales instalaciones auxiliares, entre ellas el taller de mantenimiento eléctrico y mecánico, destinados a asegurar la operatividad continua de los equipos mineros y de procesamiento.

Asimismo, el campamento principal de la unidad minera se sitúa a una cota aproximada de 4 596 m s.n.m., contando con infraestructura adecuada para el alojamiento del personal, áreas administrativas, servicios básicos y zonas de soporte operacional, garantizando condiciones mínimas de habitabilidad en un entorno de clima severo.

La unidad dispone de tres bocaminas principales, que constituyen los accesos subterráneos a las labores mineras. Estas se ubican en los niveles 4 500 m, 4 400 m y 4 300 m s.n.m., respectivamente. Dichas bocaminas permiten el ingreso y salida de personal, así como el tránsito de equipos livianos y pesados, facilitando el desarrollo de las operaciones de explotación, ventilación, transporte de mineral y manejo de materiales.

Figura 2. Ubicación geográfica de la Unidad Minera Inmaculada.



2.1.2. Accesibilidad

Desde Ayacucho el acceso a la Unidad Minera Inmaculada, es por la carretera asfaltada de la “longitudinal de la sierra” (huamanga – Abancay) por un tiempo de 7 horas, luego desde la ciudad de Abancay continuamos por la carretera asfaltada interoceánica hasta el pueblo de Iscahuaca por un tiempo de 4 horas. Para luego ingresar a la carretera afirmada Iscahuaca Inmaculada por un tiempo de 5 horas en total desde la ciudad de huamanga hasta la unidad minera es aproximadamente de 16 a 17 horas cuando las condiciones climáticas son favorables, cabe precisar también que no es la única ruta para acceder a la unidad, también se puede realizar por la ruta huamanga-puquio-Iscahuaca-U.M. Inmaculada.

2.1.3. Clima

La zona donde se emplaza la Unidad Minera Inmaculada presenta condiciones climáticas propias de un ambiente altoandino tipo puna, caracterizado por bajas temperaturas, alta radiación solar diurna y noches extremadamente frías. Estas condiciones influyen directamente en las actividades operativas, la seguridad del personal y el diseño de la infraestructura minera.

La temperatura media anual en el área del proyecto oscila aproximadamente entre 0 °C y 7 °C. Durante los meses comprendidos entre abril y septiembre, pueden registrarse temperaturas máximas diurnas que, en condiciones favorables de radiación solar, llegan a alcanzar valores de hasta 20 °C. No obstante, estas temperaturas elevadas se presentan de manera puntual y contrastan fuertemente con las condiciones nocturnas.

El área del proyecto también se caracteriza por cambios climáticos abruptos, con variaciones significativas entre el día y la noche, así como entre sectores expuestos directamente a la radiación solar y áreas permanentemente sombreadas. Estas condiciones generan microclimas locales que deben ser considerados en la planificación operativa y en las medidas de seguridad y salud ocupacional.

En cuanto al régimen de precipitaciones, se distingue un período húmedo que se extiende principalmente desde el mes de octubre hasta marzo, durante el cual se presentan lluvias de intensidad variable, así como precipitaciones sólidas en forma de nieve, especialmente en las zonas de mayor altitud. Por el contrario, entre los meses de mayo y septiembre predomina un clima marcadamente seco, con escasa o nula precipitación.

El volumen anual de precipitaciones en la zona presenta una variabilidad considerable, con registros que oscilan aproximadamente entre 200 y 400 mm en los años más secos, pudiendo alcanzar valores cercanos a 1 000 mm anuales en períodos más lluviosos. Esta

variabilidad climática debe ser considerada para la gestión hídrica, el control de escorrentías y el diseño de las instalaciones mineras.

Figura 3. Condición climática entre noviembre a marzo de la unidad minera Inmaculada.

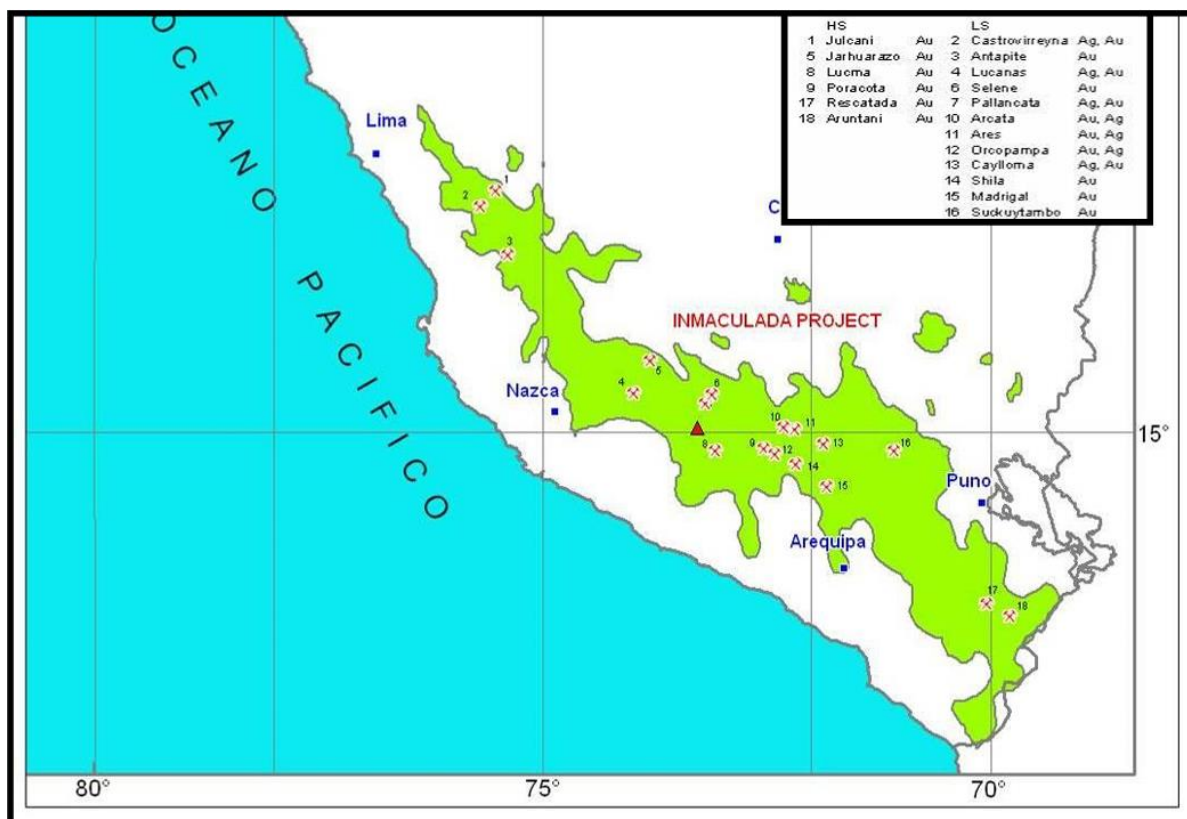


Nota: Adaptado del campamento minero de la U.M. Imaculada.

2.1.4. Marco geológico regional y estructural

El proyecto se ubica en el flanco oeste y parte central de la franja metalogénica epitermal Au – Ag puquio Caylloma, la cual es hospedada por rocas piroclásticas y coladas de lava del vulcanismo Cenozoico de la cordillera occidental del sur del Perú. En esta franja ocurren varios yacimientos epitermales de alta, media y baja sulfuración, de este último tipo tenemos las minas de producción (Au – Ag) Selene, Explorador, Ares, Arcata, Orcopampa, Paula y Caylloma.

Figura 4. Ubicación del proyecto Inmaculada en la franja metalogénica epitermal del vulcanismo Cenozoico del sur del Perú.



Nota: Adaptada del Dpto de Geología U.M. Inmaculada.

Dentro del proyecto inmaculada, las áreas de Anta-Patari, Minascucho, Tararunqui y Pararani están alineadas con rumbo NE; con instrucciones subvolcánicas en las proximidades de las vetas y halos de alteración epitermal.

En el área de estudio del proyecto Inmaculada se ha diferenciado dos series volcánicas. La primera está conformada en la base por alternancias de lavas andesíticas y debris flow – auto brecha, las cuales infrayacen a las tobas de lapilli y tobas líticas andesíticas que afloran desde el área de Anta-Patari (3100-3500msnm) y continúan en forma hasta el área de Minascucho (4100-3900msnm); las cuales han sido agrupados y asignados al Grupo Tacaza por su composición mayoritariamente andesítica. Una segunda serie volcánica la constituyen los afloramientos del área de Quellopata (4300-4800msnm) conformados por lavas de grano medio y porfiríticos y debris flow andesíticos de color verde violáceos; la cual en este informe

es correlacionada regionalmente con la Formación Saycata que aflora ampliamente entre Pallancata y Selene-Explorador.

2.1.5. Geología regional de la zona

2.1.5.1. Basamento mesozoico

Afloran en el área de San Salvador donde se encuentran expuestas por la erosión del río Ermo. Aquí afloran areniscas verdosas y conglomerados areniscos rojizos.

Formación Soraya (Jurásico)

Está constituida por capas de areniscas de granulometría fina a media de color verde pálido y blanquecino, alternadas con delgados lentes de areniscas calcáreas y margas. Hacia el tope termina en conglomerados de textura matriz soportada, estratificados en bancos gruesos. Esta formación aflora a ambos márgenes del río Ermo, donde infrayace a las capas rojas de la Formación Mara, con buzamientos subverticales hacia el Norte. Regionalmente corresponde al tope del Grupo Yura en el Sur del Perú (Formación Hualhuani). Formación Mara (Cretáceo inferior) Está conformada por sedimentos de limolitas, areniscas y conglomerados rojizos con clastos de cuarcitas, calizas de color plomizo y areniscas. Afloran ampliamente en San Salvador y la quebrada Ermo; estratificados en bancos gruesos y ligeramente laminados. Regionalmente en el Sur del Perú esta formación es conocida también con el nombre de Formación Murco.

2.1.5.2. Cenozoico

Grupo Tacaza (Oligoceno Medio - Mioceno Inferior)

Está conformada por una secuencia continua de coladas de lava y debris flow andesítico (área Anta-Patari), tobas de lapilli, tobas líticas, debris flow andesíticos, expuestos ampliamente por toda la quebrada del río Patari (desde Anta-Patari hasta Minascucho y Huancute) que en conjunto son agrupados dentro de la serie volcánica inferior.

Unidad Brecha-Debris Flow y Lava Andesítica. - Aflora ampliamente en la zona de Anta Patari, con horizontes de brechas-debris flow, alternadas con horizontes de lavas de color verde oscuras finas con cristales de plagioclasas y horblendas finas, matriz fina con magnetismo moderado a fuerte. Los afloramientos presentan fuerte a moderada deformación frágil, presentando una topografía con fuertes pendientes, como consecuencia de la erosión de las quebradas Ermo y Chaguada. En el área de Anta-Patari, esta unidad volcánica es la roca huésped de las vetas de cuarzo del tipo de baja sulfuración.

Unidad Tobas Líticas y Tobas de Lapilli Andesitas. - Aflora desde las partes altas de Anta Patari, Minascucho, al SW de Minascucho en el cerro Ojochailla y alrededores. Esta unidad cubre a los stocks subvolcánicos en Minascucho, a la unidad inferior “brecha-debris flow y lava andesítica de Anta-Patari”. Está compuesta en su mayoría por horizontes de tobas de lapilli soldados y tobas líticas estratificadas en bancos masivos y delgados, en parte laminados. Presenta líticos angulosos de volcánicos andesíticos de color verde y violáceo, de grano fino a porfiríticos y en menor proporción líticos de volcánicos riolíticos de color beige y sedimentos volcanoclásticos verdosos.

Unidad de Areniscas y Conglomerados. - Aflora localmente en Minascucho. Esta unidad presenta horizontes de arenisca conglomeradica de granulometría gruesa estratificados en bancos masivos y ligeramente con laminación horizontal sesgada, alternados con conglomerados gruesos con rodados subredondeados de composición andesítica.

Formación Quellopata (Mioceno)

Corresponde a la serie volcánica superior del área de estudio. La litología corresponde a alternancias de coladas de lava y brecha-debris flow de composición andesítica de color verde violáceo. Esta formación es parte del estrato volcán de Huarmapata, la cual está conformada por flujos de masa de textura clasto soportada y matriz soportada con clastos de volcánicos andesíticos y matriz volcánica (tobas líticas, cenizas y roca triturada y en gran parte

con autobrechamiento), intercalados con horizontes de coladas de lavas andesíticas de textura porfirítica y fina. En matriz se observa cristales de plagioclasas y horblendas, magnetita fina y trazas de pirita. Los clastos y bombas son de naturaleza polimíctica, con formas sub redondeadas y sub-angulosas, las cuales presentan colores verdes y violáceos. En forma gradacional pueden pasar a tufos líticos de similares características y ocasionalmente pueden presentar delgados niveles lacustrinos (SW del campamento de Quellopata).

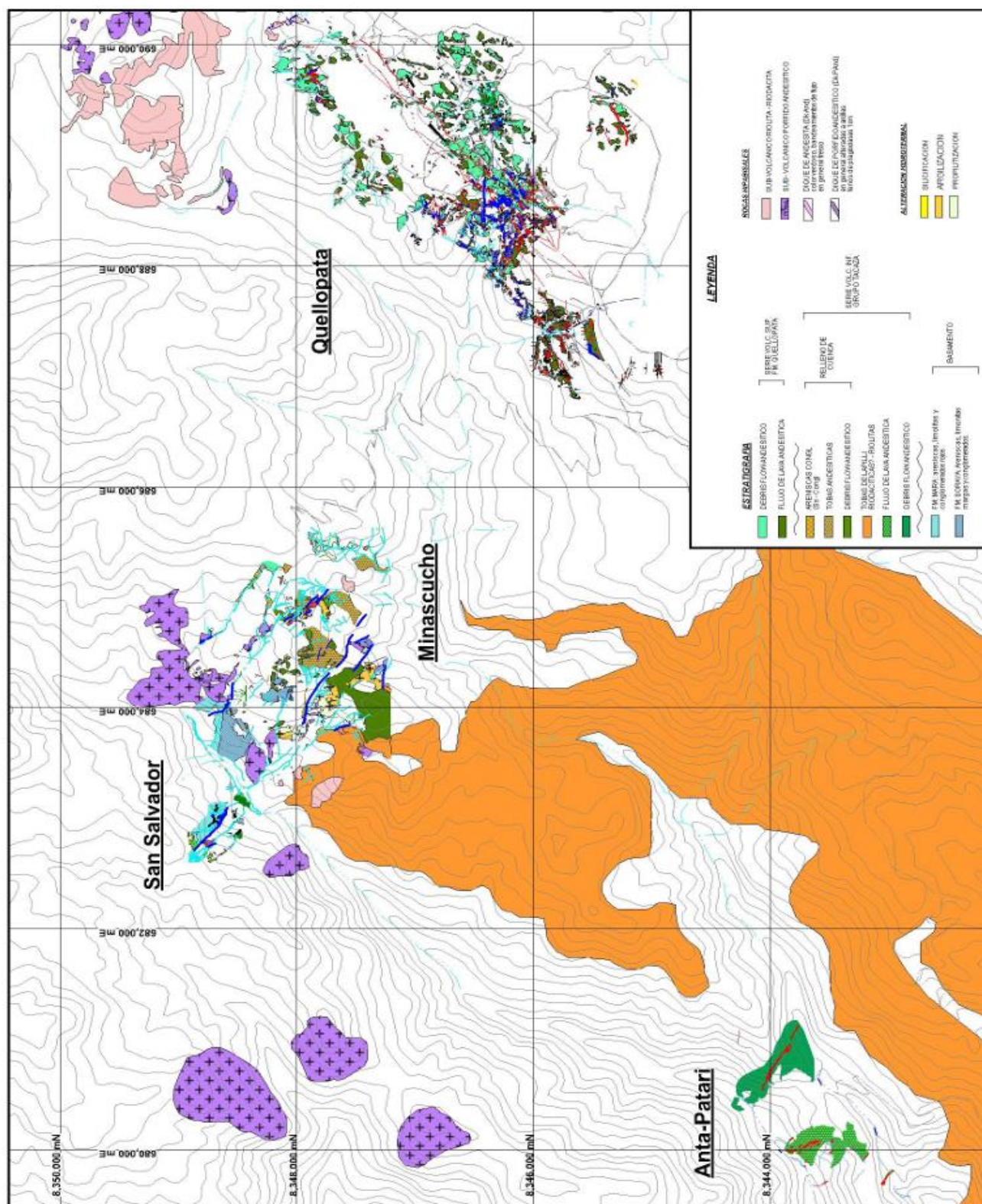
Stock Subvolcánicos, Domos y Diques

En el área de estudio se tienen afloramientos de diques de composición andesítica que intruyen el basamento Mesozoico, así como también diques de composición andesítica y riolítica que intruyen a las unidades volcánicas del área de estudio. Los afloramientos de stock subvolcánicos se encuentran expuestos ampliamente en Minascucho-San Salvador, centro volcánico de Huarmapata, área de Puquiopata-Pararani. A continuación, se describen cada una de ellas:

- ***Diques de Andesitas.*** - Afloran en las periferias de San Salvador, donde intruyen a los sedimentos jurásicos, llegándose a diferenciar dos familias de diques por sus características texturales. El primero corresponde a diques de andesitas de matriz fina de tonalidad verdosa y matriz cristalina con plagioclasas equigranulares. Presentan anchos de afloramiento de 2m a 3m, las cuales intruyen a la Formación Mara, en forma oblicua con azimuth NE-SW y buzamiento subvertical hacia el NW, con estructuras de bandeamientos de flujo débil hacia las cajas. El segundo tipo corresponde a diques de andesita de matriz argilitizada de textura porfirítica orientados con azimuth NW-SE y buzamientos subverticales, con fenos de plagioclasas mayores a 1cm dentro de una matriz fina. Presenta bandeamientos de flujo hacia las cajas. En ambos casos se desconoce la edad de estos diques.

- **Unidad Subvolcánica de Pórfido Andesítico.** - Aflora hacia el SW de Minascucho en el cerro Ojochailla y alrededores con alineación NW - SE con anchos de afloramiento de 200m a 500m y en una longitud de 1.6Km aproximadamente. Otro afloramiento se tiene en el cerro Umachata (al Norte de Minascucho). En ambas partes se encuentran argilitizados y piritizados, con halos de propilitización y oxidación hacia los bordes del afloramiento. Este subvolcánico hacia la margen SW del río Ermo intruye a la Formación Soraya, llegando al grado de horfels, en parte con oxidación débil. Igualmente, intruye a la serie volcánica inferior (Grupo Tacaza). En Quellopata se tiene en profundidad reconocida mediante taladros profundos un pórfido andesítico silicificado y piritizado. Igualmente, en Huarmapata se tiene un pórfido andesítico fresco.
- **Unidad de Domos de Riolita - Riodacita.** - Se han reconocido varios domos de riolita riodacita entre las áreas de Minascucho, Quellopata y Pararani. En Minascucho (cerro Ojochailla), afloran hasta tres domos de riolita frescos y alterados presentando halos de argilitización, silicificación y piritización. En Pararani (cerro Huachualluni - Puquiopata) aflora un domo de riolita silicificado, cortado por una veta de cuarzo blanco de azimuth NW. En Quellopata hacia el NE próximo a Huarmapata aflora un domo de riolita alterado, el cual intruye a las capas de debris flow y coladas de lavas andesíticas Formación Quellopata.

Figura 5. Geología regional de la Unidad Minera Inmaculada.



Nota: Adaptado del Dpto. de Geología U.M. Inmaculada.

2.1.6. Mineralización y alteración

El proyecto Inmaculado presenta dos estilos de mineralización epitermal.

Primera fase de mineralización.

Vetas epitermales de Ag⁺- Zn-Pb de baja sulfuración con metales base, compuestas de cuarzo blaquesino y calcedonia gris, con brechamiento, texturas bandeadas, coloformes, crustiformes, granulares y masivas; entre los minerales que albergan estas vetas tenemos pirita (abundante en forma granular y cubica fina), calcopirita, calcosina, esfalerita, galena, acantita (en puntos diseminados de la veta) y patinas de oxido de Fe, Mn, goethita, hematita, psilomelanos, malaquita. Las cajas presentan a ambos lados de las vetas, silicificación incipiente, seguida de argilitización y propilitización hacia la periferia, acompañada de oxidación supergena. Las vetas. Las vetas pertenecientes a esta fase de mineralización son Rebeca, Verónica, Marina, Organa, Lourdes, Teresa y Juliana.

Segunda fase de mineralización

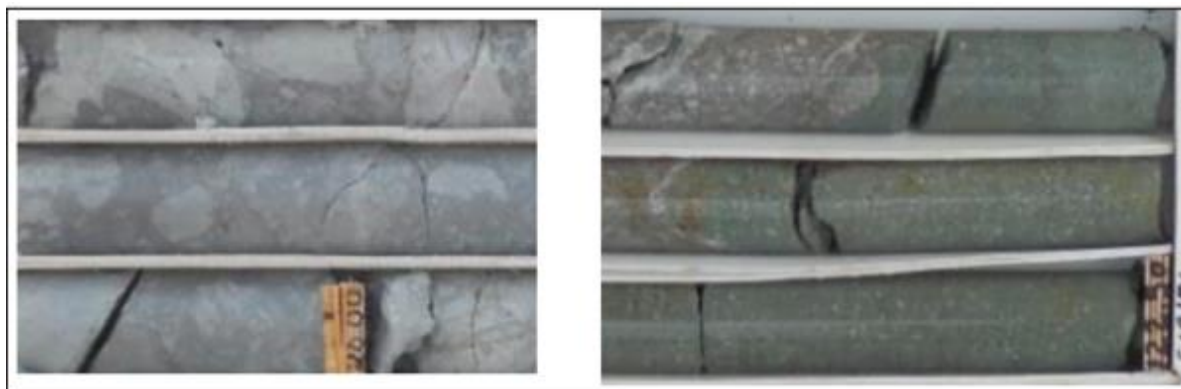
Vetas epitermales de Au⁺- Ag de baja sulfuración, compuestas de cuarzo blanco con texturas de remplazamiento de carbonatos, coloforme, bandeado, drusas en oquedades, puntos de pirita cúbica fina, pirargirita, venillas de rodocrosita, adularía, patinas ligeras de oxido de hierro, localmente marcasita en los niveles altos. La caja por lo general presenta silicificación incipiente (menor a 1 m para ambos lados), seguida de propilitización hacia la periferia con esmectita, clorita y pirita. A este grupo pertenecen las vetas Martha, Angela, Roxana, Lucy, Shakira, Sara, Pirita, Karina, Mellisa, Kattia y Jimena.

2.1.7. Geología local de la zona (zona Angela y Barbara)

Aflora ampliamente en la zona, horizontales de brechas – debris Flow, alternadas con horizontes de lavas de color verde oscuras finas con cristales de plagioclasas y horblendas

finas, matriz fina con magnetismo moderado a fuerte. Esta unidad volcánica es la roca huésped de las vetas de cuarzo de tipo de baja sulfuración.

Figura 6. Roca debris Flow que es de la zona Angela y la andesita de la zona Barbara.



Nota: Adaptado del Dpto de Geología U.M. Inmaculada

2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.2.1. Antecedentes Internacionales

Wang et al. (2022), en su artículo publicado en la revista Materials, tuvieron por objetivo evaluar el efecto de acelerantes libres de álcalis en el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete y su relación con el proceso de hidratación del cemento. La metodología empleada fue experimental, considerando mezclas de shotcrete con diferentes dosificaciones de acelerantes (entre 4 % y 8 % respecto al peso del cemento), ensayos de resistencia a la compresión a edades tempranas (1 h, 3 h, 6 h y 24 h), calorimetría isotérmica y análisis microestructural. Los resultados demostraron que las mezclas con acelerante alcanzaron incrementos de resistencia temprana entre 35 % y 65 % a las 3 horas en comparación con mezclas sin acelerante, logrando valores superiores a 2.0 MPa antes de las 2 horas, mientras que el shotcrete convencional no superó 1.2 MPa en el mismo periodo. Asimismo, se observó que la resistencia a 28 días se mantuvo dentro de una variación menor al ± 5 %, evidenciando que el acelerante no afectó negativamente la resistencia final. Se concluye que el uso controlado de acelerantes libres de álcalis permite mejorar

significativamente la resistencia temprana del shotcrete y reducir los tiempos de reingreso seguro, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa en aplicaciones subterráneas.

Zhang et al. (2024), en su artículo publicado en la revista *Buildings*, tuvieron por objetivo analizar el mecanismo de acción de los acelerantes de fraguado y su influencia cuantitativa en la resistencia temprana del shotcrete. La metodología empleada fue experimental-analítica, incluyendo ensayos de resistencia a la compresión a edades de 2 h, 4 h, 6 h y 24 h, junto con análisis mineralógicos mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Los autores evaluaron diferentes dosificaciones de acelerante, comparándolas con una mezcla de referencia sin aditivo. Los resultados demostraron que las mezclas con acelerante presentaron incrementos de resistencia temprana del orden del 40 % al 70 % a las 4 horas, alcanzando valores promedio de 2.5 a 3.0 MPa, mientras que la mezcla de control alcanzó aproximadamente 1.5 MPa. Asimismo, se evidenció que una dosificación excesiva generó una reducción de hasta 8 % en la resistencia a 28 días, confirmando la necesidad de optimizar el diseño. Se concluye que el diseño adecuado del shotcrete con acelerantes permite mejorar de forma sustancial la resistencia temprana, siempre que se controle la dosificación para evitar efectos adversos en el desempeño a largo plazo.

Du et al. (2025), en su artículo publicado en la revista *Construction and Building Materials*, tuvieron por objetivo investigar la relación entre el uso de acelerantes y el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete bajo condiciones de baja temperatura, simulando escenarios operativos adversos. La metodología empleada fue experimental, considerando ensayos de resistencia a la compresión temprana a temperaturas entre 5 °C y 10 °C, comparando mezclas con y sin acelerante. Los resultados demostraron que el shotcrete con acelerante alcanzó incrementos de resistencia temprana superiores al 80 % a las 2 horas, logrando valores cercanos a 2.2 MPa, mientras que las mezclas sin aditivo no superaron 1.2 MPa en el mismo intervalo. A las 4 horas, la diferencia se mantuvo con incrementos del orden

del 60 %, reduciendo de manera significativa los tiempos necesarios para el reingreso seguro. Se concluye que el uso de acelerantes es un factor determinante para garantizar el desempeño temprano del shotcrete en condiciones críticas, mejorando la seguridad operacional y reduciendo los tiempos muertos asociados al sostenimiento en minería subterránea.

Contreras (2021), buscó optimizar el proceso de sostenimiento con shotcrete en un ciclo minero típico a través de un estudio experimental, descriptivo donde se llevó a cabo el análisis detallado de las operaciones actuales y de la identificación de las principales dificultades, en el cual se propuso estrategias para mejorar la eficiencia y reducir costos. Se evidenció que la preparación de la mezcla de concreto se realizaba manualmente, donde el aditivo acelerante era vertido directamente en la boquilla del robot, mientras que el retardante y el reductor de agua en la mezcla, requiriendo técnicamente de este último un 0.71% en peso de la proporción del cemento y 1.35% respectivamente. No obstante, se constató en 19 muestras analizadas variaciones en la dosificación de dichos aditivos, desviándose de los criterios establecidos. El consumo de fibras era 1 Kg más del requerido (15 Kg por mezcla), y con un asentamiento de 5cm, estando por debajo de la establecido (14 cm), los costos totales manejados se estimaron en \$9233.41. Para la propuesta, se realizaron ensayos para ajustar la dosificación del acelerante, retardante y reductor de agua, constatando que las cantidades de estos últimos era posible disminuir hasta un 50 % de la actual, luego añadiendo un 0.28% después de 30 minutos y mezclando continuamente el acelerante y de esta manera obtener una mezcla capaz de ser bombeable con un asentamiento de 24 cm, reduciendo considerablemente el consumo de este aditivo y los costos se ubicaría en \$8973.78, reduciendo un 3% del monto inicial. Se concluyó que, se puede disminuir los costos del proceso de sostenimiento con Shotcrete, optimizando el consumo de los aditivos de la mezcla, obteniendo un asentamiento mayor del mínimo requerido en las labores del minado.

Graba et al. (2024), revisaron el rendimiento a largo plazo del shotcrete en diferentes condiciones de servicio. En primer lugar, se presentaron y analizaron las características microestructurales del hormigón proyectado. Luego, se resumieron y discutieron las resistencias mecánicas, la contracción y la durabilidad relevantes a largo plazo. Los resultados mostraron que el shotcrete exhibió resistencias mecánicas iniciales superiores, pero disminuyó gradualmente con el tiempo. En términos de rendimiento de contracción, tuvo altos valores de deformación por contracción como resultado del alto contenido de cemento y el efecto de los aceleradores y la durabilidad se deteriora con el tiempo debido al aumento de la porosidad de la matriz causado por el efecto de los agentes aceleradores. Las mejoras potenciales en algunas de estas propiedades se pueden lograr con la inclusión de materiales cementosos suplementarios (SCM), refuerzos fibrosos (FR), aditivos químicos (CA) y otros aditivos (OA). A manera de conclusión, el estudio proporciona nuevas direcciones de investigación para estudios posteriores y desarrollo de mezclas innovadoras de mezcla de shotcrete con características mecánicas y de durabilidad mejoradas a largo plazo.

2.2.2. Antecedentes Nacionales

Cruz y Silvestre (2024), analizaron el impacto del tiempo de fraguado en los costos de producción de la veta Principal Nv 4050 de la unidad operativa Chungar - Volcán Compañía Minera S. A. A. Para ello, se empleó una metodología aplicada, descriptiva y cuantitativa, en el cual se determinó la relación entre el consumo de cemento y una mezcla de cemento y resina con el tiempo de inyección y la carga aplicada en cable Bolting para reducción de los costos de producción. El consumo promedio por taladro fue menor al utilizar resina (19.54 kg) comparado con cemento (23.06 kg) y la mezcla (22.33 kg). Aunque el tiempo de inyección de la resina fue ligeramente mayor (3.24 min), su tiempo de fraguado fue significativamente menor (1.73 horas), seguido de la mezcla (1.45 horas) y el cemento (24 horas). Los costos totales para cemento, resina y la mezcla fueron de \$15,410.25, \$16,376.95 y \$7,137.43,

respectivamente. Se concluyó que, el uso de resina y una combinación de cemento y resina permite un fraguado mucho más rápido que el cemento tradicional, lo que se traduce en una reducción considerable de tiempo y costos operativos.

Salvador y Buendia (2023), presentaron un estudio enfocado en mejoras de sostenimiento con Shotcrete vía húmeda para la reducción de los costos operativos en la Unidad Minera San Cristóbal. A través de una investigación aplicada, nivel explicativo, realizaron pruebas al shotcrete para garantizar su resistencia y se optimizó el proceso de producción, reduciendo pérdidas y costos. Se cambió el tipo de fibra utilizada, lo que agilizó el fraguado y disminuyó los gastos. La sustitución de la fibra Enduro 600 por la Barchic R50, permitió optimizar el consumo de pernos y malla, resultando en un ahorro mensual de \$8,915.33 dólares en los costos de sostenimiento, mientras que, la implementación de tanques de aditivo en superficie y su posterior traslado neumático a interior mina resultó en un ahorro significativo de \$11,873 dólares mensuales. Se concluyó que al sustituir materiales y facilitar la disposición de algunos materiales para el fraguado, se puede optimizar el proceso, mejorándolo y disminuyendo los costos.

Talavera (2023), presentó un estudio en que optimizó el lanzado de Shotcrete a fin de reducir los costos operativos mediante la modificación de la mezcla, incorporando fibras para mejorar la eficiencia y durabilidad del sostenimiento. Para ello, usó una metodología aplicada, cuasiexperimental, con enfoque cuantitativo en que llevó a cabo para validar la formulación de la mezcla del shotcrete con fibras metálicas y sintéticas. Los resultados evidenciaron que el uso de la fibra sintética superó a la fibra metálica en la mezcla en términos de resistencia a la compresión y absorción de energía, con un aumento promedio de 57.20 kg/cm². Sin embargo, el costo por metro cúbico de la mezcla con fibra sintética resultó ser S/. 109.14 más elevado que el de la mezcla con fibra metálica, por lo que el estudio se inclinó por el uso de

fibra metálica. Se concluyó que, optimizando los agregados de la mezcla del shotcrete, se puede reducir los costos operacionales.

Meléndez (2018), en su trabajo magistral se centró en acelerar el fraguado del shotcrete en la mina Marca Punta Norte para optimizar el ciclo de minado y aumentar la productividad. Se desarrolló un estudio aplicado, experimental, en donde se llevaron a cabo ensayos no destructivos (penetrómetro y pistola Hilti) y destructivos (compresión uniaxial) en labores sostenidas con shotcrete. Mediante mediciones periódicas durante tres meses, se evaluó la relación entre el tiempo y el desarrollo de la resistencia del material. Los resultados experimentales demostraron que al adicionar 28 litros/m³ de acelerante líquido libre de álcalis (aditivos hiperplastificantes a base de policarboxilato y dióxido de silicio), el shotcrete alcanzó una resistencia a la compresión de 12 kg/cm² a la hora de fraguado y de 20 kg/cm² a las dos horas, lo que permitió mejorar significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del material. Como conclusión, se demostró que, al incorporar aditivos específicos, se obtiene un material más resistente y un tiempo de fraguado más rápido, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y productividad de la industria minera.

2.2.3. Antecedentes locales

Quispe (2024), en su estudio titulado “Análisis de la dosificación en el diseño de shotcrete para la reducción de costos en procesos de minería subterránea”, publicado como tesis de pregrado en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), tuvo por objetivo analizar la dosificación de insumos en el diseño de shotcrete aplicado en minería subterránea y evaluar su implicancia en los costos de sostenimiento operacional. La metodología empleada fue experimental y de diseño de mezclas, en la cual se compararon dosificaciones de shotcrete original y ajustada; se prepararon probetas de concreto proyectado con la dosificación utilizada por la Compañía Catalina Huanca (diseño $F'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$) y una mezcla optimizada con reducción de 20 kg de cemento por m³, siguiendo normas técnicas

(ASTM/ACI/NTP) y realizando ensayos de resistencia a compresión simple, slump y control de calidad de agregados. Los resultados demostraron que las resistencias simples de las probetas de la dosificación original superaron en un rango de 77 % a 89 % el requisito de diseño de 300 kg/cm², lo cual indicó un uso excesivo de cemento, mientras que la nueva dosificación cumplió los parámetros técnicos exigidos, alcanzando más de 2 MPa de resistencia temprana a las 3 h y estabilidad de slump superior a 6 in antes de las 2 h. En términos económicos, el ajuste de dosificación permitió una reducción de costos de sostenimiento de 22 688,40 USD en el primer trimestre, proyectándose una disminución acumulada de 90 753,60 USD en un año. Se concluye que la optimización de la dosificación del shotcrete disminuye significativamente los costos operativos sin comprometer la calidad técnica requerida para sostenimiento en minería subterránea.

Marchena (2025), en su estudio titulado Mejora operativa de la flota de equipos de sostenimiento mediante la implementación de una planta de shotcrete en interior mina publicado como tesis en la Universidad Nacional de Ingeniería, tuvo por objetivo analizar el impacto de implementar una planta de shotcrete en interior mina sobre la eficiencia operativa, productividad y costos en los procesos de sostenimiento subterráneo. La metodología empleada fue de tipo experimental y comparativo, en la que se midieron indicadores operativos antes y después de implementar la planta: se evaluaron los tiempos por ciclo de trabajo de los equipos de sostenimiento, la utilización efectiva de la flota, y los costos asociados al acarreo, transporte y aplicación del shotcrete. Los resultados demostraron que la instalación de la planta redujo significativamente el tiempo por ciclo de los equipos de sostenimiento, pasando de 3,0 horas a aproximadamente 1,6 horas, lo que representó un incremento del 15 % en la utilización efectiva de la flota. Además, se observó una disminución de costos de producción de shotcrete de 6,98 USD por metro cúbico producido, atribuida a menores costos de acarreo de material, consumo de combustible y desgaste de equipos de transporte. Se concluye que la implementación de una planta de shotcrete en interior mina

contribuye a optimizar los procesos de sostenimiento, reduciendo tiempos operativos y costos, y mejorando la seguridad al permitir la aplicación inmediata del shotcrete, reduciendo la exposición geomecánica de las labores subterráneas.

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.2. Sostenimiento en la minería subterránea

El sostenimiento en la minería subterránea comprende el conjunto de elementos estructurales y técnicas de refuerzo instalados dentro del macizo rocoso o en el perímetro de una excavación con el propósito de mantener la estabilidad del terreno, controlar las deformaciones y prevenir desprendimientos de roca que puedan comprometer la seguridad del personal y la continuidad operativa de la labor minera. De acuerdo con Hoek y Brown (1980), el sostenimiento no busca impedir totalmente el movimiento del macizo rocoso, sino controlarlo dentro de límites aceptables, permitiendo que el sistema roca–sostenimiento trabaje de manera conjunta.

El diseño del sostenimiento se basa en la caracterización geomecánica del macizo rocoso, considerando parámetros como la resistencia de la roca intacta, la presencia y orientación de discontinuidades, el estado de esfuerzos in situ y las condiciones hidrogeológicas. Sistemas de clasificación geomecánica como el Rock Mass Rating (RMR) propuesto por Bieniawski (1989) y el Q-System desarrollado por Barton, Lien y Lunde (1974) constituyen herramientas fundamentales para la selección y dimensionamiento del sostenimiento, ya que permiten establecer criterios técnicos en función de la calidad del macizo rocoso y el tipo de excavación.

Para garantizar un adecuado control de la estabilidad, las operaciones mineras subterráneas establecen estándares de sostenimiento, los cuales son documentos técnicos que definen los tipos de sostenimiento, espaciamientos, longitudes y secuencias de instalación

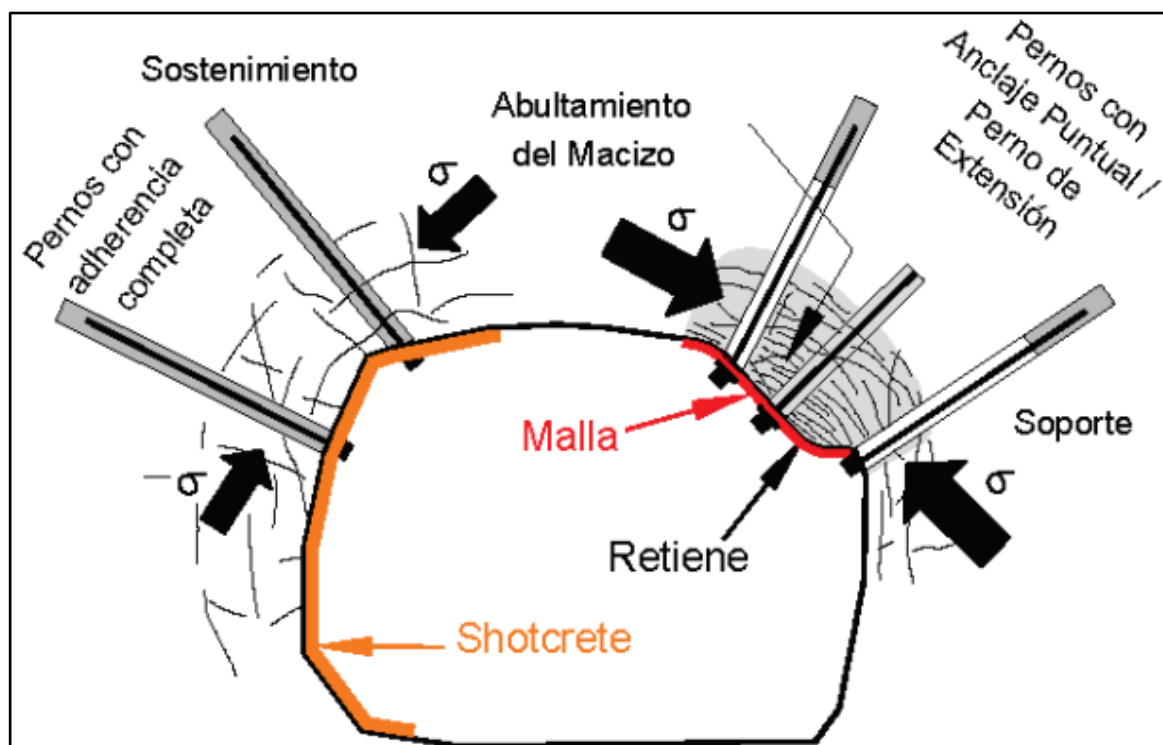
según la calidad del macizo rocoso y el tipo de labor minera. Estos estándares son elaborados y validados por el especialista en mecánica de rocas, y su aplicación permite asegurar la calidad del sostenimiento, así como el cumplimiento de los requisitos mínimos aceptables de seguridad (Brady & Brown, 2006).

Desde un enfoque funcional, el sostenimiento puede clasificarse en sostenimiento activo y sostenimiento pasivo. El sostenimiento activo, como los pernos de roca y cables, interactúa directamente con el macizo rocoso reforzándolo internamente y mejorando su capacidad autoportante. Por su parte, el sostenimiento pasivo, como el shotcrete, mallas metálicas y cimbras, actúa principalmente conteniendo los bloques sueltos y distribuyendo las cargas hacia el macizo circundante (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995).

En la Unidad Minera Inmaculada, se emplea una combinación de distintos elementos de sostenimiento, seleccionados de acuerdo con las condiciones geomecánicas y el carácter de la labor minera, ya sea temporal o permanente. Entre los elementos más representativos se encuentran los pernos de roca, utilizados para el refuerzo del macizo rocoso mediante anclaje; el shotcrete, aplicado como recubrimiento superficial para el control de desprendimientos y la protección de las excavaciones; los cables de anclaje, empleados en zonas de mayor exigencia estructural; así como cimbras metálicas, cintas strapp y mallas metálicas (mesh strapp), que proporcionan soporte adicional en zonas de baja calidad geomecánica o en labores de carácter permanente.

La correcta selección, diseño e instalación de estos sistemas de sostenimiento es fundamental para asegurar la estabilidad a largo plazo de las excavaciones subterráneas, minimizar los riesgos geotécnicos y garantizar condiciones seguras de trabajo. En este sentido, la integración del análisis geomecánico con los estándares operativos permite optimizar el desempeño del sostenimiento y adaptarlo a las condiciones específicas del yacimiento, como ocurre en la Unidad Minera Inmaculada.

Figura 7. Elementos de sostenimiento.



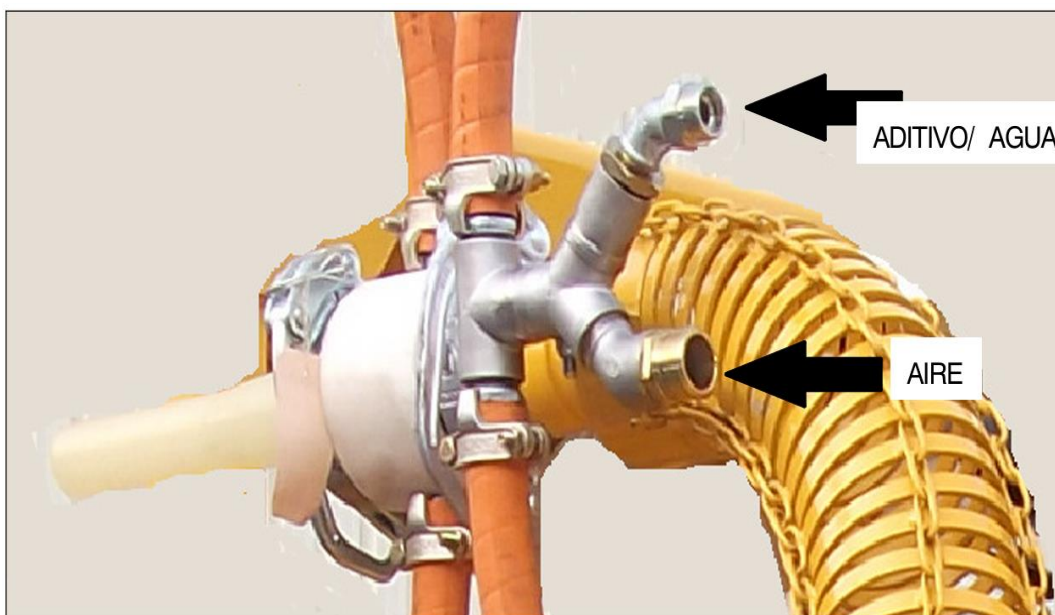
Nota: Adaptado de Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Osinergmin. (2017).

2.4. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA TEMPRANA DEL SHOTCRETE CON EL USO DEL ADITIVO MR-193 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS.

2.4.1. Shotcrete

El shotcrete, o concreto proyectado, constituye uno de los sistemas de sostenimiento más utilizados en la minería subterránea moderna, especialmente en operaciones ubicadas en zonas de alta montaña, donde las condiciones geomecánicas, climáticas y operativas demandan soluciones de rápida instalación y pronta ganancia de resistencia. En este contexto, el shotcrete no debe ser entendido únicamente como un material de recubrimiento, sino como un sistema estructural activo-pasivo que interactúa con el macizo rocoso, contribuyendo a su confinamiento superficial y a la estabilidad inmediata de las excavaciones (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995).

Figura 8. Cabezal proyector de shotcrete vía húmeda.



Nota: Adaptado de Documentación técnica wetkret 4

En la Unidad Minera Inmaculada, localizada a altitudes superiores a los 4 300 m s.n.m., el uso del shotcrete resulta crítico debido a factores como la baja temperatura ambiental, la alta amplitud térmica diaria y la necesidad de habilitar labores en plazos cortos para garantizar la continuidad del ciclo productivo. En este tipo de operaciones, la resistencia temprana del shotcrete se convierte en un parámetro clave, ya que permite reducir los tiempos de espera, habilitar labores de manera segura y minimizar el riesgo de desprendimientos de roca inmediatamente después del avance de la excavación.

Desde el punto de vista constructivo, el shotcrete se caracteriza por ser un proceso integral, en el cual la colocación, compactación y adherencia del concreto se realizan en una sola etapa, eliminando la necesidad de encofrados y vibración externa. Esta particularidad lo diferencia sustancialmente del concreto convencional y lo hace especialmente adecuado para superficies irregulares y condiciones de espacio restringido, propias de las labores subterráneas (Salvador et al., 2019; Ikumi et al., 2022).

Mendes et al. (2018) señalan que el shotcrete desarrolla una resistencia inicial elevada gracias a su método de proyección a alta velocidad y al uso de aditivos aceleradores de

fraguado, los cuales permiten que el material alcance valores de resistencia suficientes en cortos periodos de tiempo. Esta propiedad es fundamental en minas subterráneas como Inmaculada, donde la seguridad operacional depende de la rápida estabilización del macizo rocoso expuesto.

Asimismo, Baricevic et al. (2018) destacan que el shotcrete presenta ventajas técnicas determinantes para su aplicación en minería, tales como la excelente adherencia al sustrato rocoso, el rápido incremento de resistencia durante las primeras horas, la buena compactación, y la facilidad de aplicación en zonas de difícil acceso, características que lo convierten en un elemento esencial tanto para el sostenimiento temporal como permanente.

2.4.1.1. Componentes del shotcrete

El desempeño mecánico, la durabilidad y, especialmente, el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete dependen directamente de la selección adecuada de sus componentes y de la correcta interacción entre ellos. En minería subterránea de alta altitud, como en la Unidad Minera Inmaculada, donde predominan bajas temperaturas ambientales y exigencias operativas inmediatas, el control de los materiales que conforman el shotcrete resulta determinante para garantizar la estabilidad temprana de las excavaciones y la eficiencia del sostenimiento.

Los principales componentes del shotcrete incluyen el cemento, los agregados, el agua, los aditivos químicos y, en algunos casos, fibras de refuerzo. Cada uno de estos materiales cumple una función específica en la mezcla y su correcta dosificación influye directamente en la resistencia inicial, la adherencia al macizo rocoso y el comportamiento del material durante las primeras horas posteriores a su aplicación.

Cemento

El cemento es el principal material aglomerante del shotcrete y se obtiene a partir de la pulverización del clinker Portland, al cual se le adiciona una cantidad controlada de yeso natural, con la finalidad de regular el tiempo de fraguado (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2018). En el shotcrete para minería subterránea, el tipo de cemento empleado influye de manera directa en la velocidad de hidratación, el desarrollo de resistencia temprana y el comportamiento del material frente a condiciones ambientales adversas.

Según el MTC (2018), el cemento Portland se clasifica, de acuerdo con su uso, en cinco tipos principales:

- Tipo I: Cemento de uso general, empleado cuando no se requieren propiedades especiales de resistencia o durabilidad.
- Tipo II: Cemento de uso general con moderada resistencia a los sulfatos y menor calor de hidratación, adecuado para ambientes con agresividad química moderada.
- Tipo III: Cemento de alta resistencia inicial, ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere una rápida ganancia de resistencia, como en el sostenimiento con shotcrete en minería subterránea.
- Tipo IV: Cemento de bajo calor de hidratación, utilizado principalmente en estructuras masivas para controlar fisuración térmica.
- Tipo V: Cemento con alta resistencia a los sulfatos, recomendado en ambientes altamente agresivos o con presencia significativa de aguas sulfatadas.

En el contexto de la Unidad Minera Inmaculada, donde las labores se desarrollan a grandes altitudes y con temperaturas medias bajas, el uso de cementos de alta resistencia inicial (Tipo III) resulta especialmente favorable, ya que permite compensar la ralentización del proceso de hidratación causada por el frío, contribuyendo a una rápida estabilización del sostenimiento. Esta característica es clave para reducir los tiempos de espera antes del reingreso a la labor y optimizar los costos operativos asociados a paralizaciones.

Asimismo, el shotcrete especial utilizado en minería puede incluir mezclas cementicias patentadas diseñadas para ofrecer mayor resistencia a la corrosión y al ataque químico, condiciones frecuentes en ambientes subterráneos. De acuerdo con el ACI Committee 506 (2016), entre los cementos especiales más utilizados se encuentran el cemento de aluminato de calcio y el cemento de fosfato de magnesio, los cuales presentan rápido endurecimiento y elevada resistencia temprana, siendo adecuados para aplicaciones donde se requiere soporte inmediato.

La interacción entre el cemento seleccionado y el aditivo acelerante MR-193, evaluado en esta investigación, es un aspecto fundamental, ya que un cemento con adecuada reactividad permite maximizar la eficiencia del aditivo, logrando resistencias tempranas óptimas sin comprometer la resistencia final del shotcrete.

Agregados

Los agregados constituyen la mayor proporción volumétrica del shotcrete y cumplen un rol esencial en la resistencia mecánica, la trabajabilidad, la adherencia y el control del rebote durante la proyección. El MTC (2018) define los agregados como todo material granular de origen mineral, tales como arena, grava, escoria o piedra triturada, que se incorpora a la mezcla de concreto en diferentes tamaños de partículas.

Llamados también áridos, son materiales inertes que se combinan con los aglomerantes (cemento, cal, etc) y el agua formando los concretos y morteros. La importancia de los agregados radica en que constituyen alrededor del 75% en volumen de una mezcla típica de concreto.

Por lo anterior es importante que los agregados tengan buena resistencia, durabilidad y resistencia a los elementos, que su superficie este limpio de impurezas como barro, limo y materia orgánica, que pueden debilitar el enlace con la pasta del cemento.

Los agregados naturales se clasifican en:

- Agregados finos (arena fina, arena gruesa)
- Agregados gruesos (grava, piedra)

Granulometría

La granulometría es la distribución por tamaño de las partículas de arena. La distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. Las mallas normalizadas utilizadas para el agregado fino son las N° 4, 8, 16, 30, 50, y 100. La cantidad y las características del material fino son elementos especialmente cruciales. Los siguientes factores deben tenerse en cuenta en la preparación de mezclas húmedas:

- El diámetro máximo debe ser de 8mm a 10 mm esto se debe a limitaciones en el equipo de bombeo y para evitar pérdidas significativas por rebote.
- La curva de granulometría del agregado también reviste una gran importancia, especialmente en su parte inferior. El contenido de material fino el tamiz N°100 no debe caer por debajo del 4% al 5% ni superar el 8% al 9%.
- La presencia excesiva de materiales finos de tamaño muy pequeño puede dar lugar a segregación, problemas de lubricación y riesgo de bloqueo.

En el shotcrete utilizado en minería subterránea, los agregados pueden provenir de materiales naturales, de machaqueo o de una combinación de ambos. Su correcta selección y clasificación es fundamental para garantizar una proyección eficiente y una adecuada compactación del material sobre el macizo rocoso. Sánchez y Tapia (2019) indican que el uso de agregados más finos favorece la cohesión de la mezcla y reduce la retracción, mientras que el uso de agregados más gruesos tiende a incrementar el porcentaje de rebote, lo cual impacta negativamente en el rendimiento y los costos del sostenimiento.

En función del espesor de la capa de shotcrete y de las condiciones de aplicación, se selecciona la granulometría más adecuada; sin embargo, en la práctica minera no es usual el empleo de agregados con tamaños mayores a 15 mm, ya que estos dificultan la proyección y aumentan las pérdidas por rebote (Sánchez & Tapia, 2019).

Para la elaboración de shotcrete, los agregados deben cumplir con una granulometría controlada, correspondiente a la gradación N.º 2, la cual permite obtener una mezcla equilibrada entre trabajabilidad, adherencia y resistencia mecánica. En la Unidad Minera Inmaculada, el control granulométrico de los agregados adquiere especial relevancia, ya que una mezcla adecuadamente gradada contribuye a optimizar el desempeño del aditivo MR-193, mejorar la resistencia temprana y reducir el consumo de material, impactando positivamente en los costos operativos.

En la Tabla 2 se presenta el rango de porcentaje en el cual debe encontrarse la granulometría de la arena utilizada para la preparación del shotcrete, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos para aplicaciones subterráneas.

Tabla 2. Límites de clasificación para agregados combinados.

Tamaño de agregado – Malla cuadrada estándar (U.S.)	Gradación N.º 1 (%)	Gradación N.º 2 (%)
3/4 pulg. (19 mm)	—	—
1/2 pulg. (12 mm)	—	100
3/8 pulg. (10 mm)	100	90 – 100
N.º 4 (4.75 mm)	95 – 100	70 – 85
N.º 8 (2.4 mm)	80 – 98	50 – 70
N.º 16 (1.2 mm)	50 – 85	35 – 55
N.º 30 (600 µm)	25 – 60	20 – 35
N.º 50 (300 µm)	10 – 30	8 – 20
N.º 100 (150 µm)	2 – 10	2 – 10

Nota: Adaptada de ACI 506R (2016).

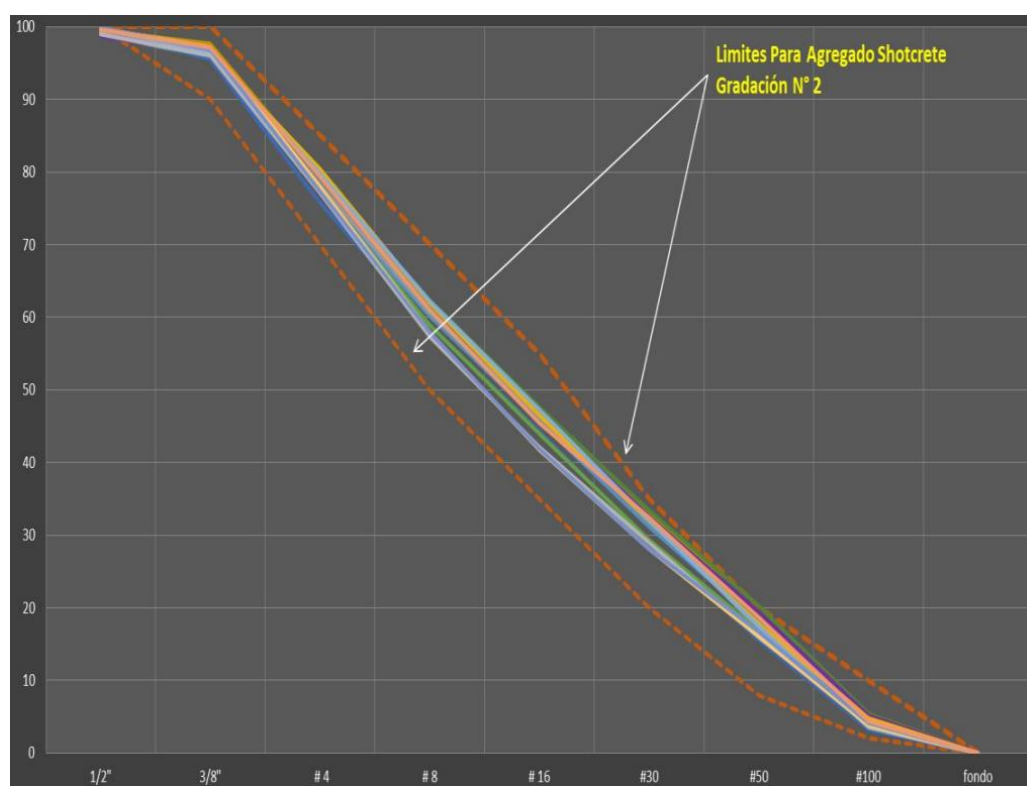
Agregado usado en la unidad minera inmaculada

Según la descripción del ASTM C125, se entiende por agregado fino aquel material derivado de la desintegración de rocas, ya sea de forma natural o artificial, que pasa a través del tamiz de 9.5 mm (3/8") y cumple con las especificaciones establecidas en la norma NTP 400.037 y/o ASTM C33. En una mezcla de concreto estándar, el agregado fino puede representar hasta el 75 % de su volumen total. Por lo tanto, es fundamental destacar la importancia del control de calidad de este componente.

Tabla 3. Tipos de gradación del agregado.

Malla	Gradación 1 (%)	Gradación 2 (%)	Gradación 3 (%)
3/4"	—	—	100
1/2"	—	100	80 – 95
3/8"	100	90 – 100	70 – 90
#4	95 – 100	70 – 85	50 – 70
#8	80 – 100	50 – 70	35 – 55
#16	50 – 85	35 – 55	20 – 40
#30	25 – 60	20 – 35	10 – 30
#50	10 – 30	8 – 20	5 – 17
#100	2 – 10	2 – 10	2 – 10

Nota: Adaptada de Área de geomecánica U.M. Inmaculada.

Figura 9. Especificación para ensayos de agregados fino (Gradación N°2).

Nota: Adaptada de Área de geomecánica U.M. Inmaculada.

El agregado fino no debe superar el 45% de partículas que atraviesen cualquier tamiz y queden retenidas en el tamiz siguiente más pequeño.

Según Duff Abrams, podemos describir la finura media del agregado utilizando la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado}(3/8'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

El intervalo medio de gradación se considera aceptable en un rango de 3.5 a 3.9 y un valor más elevado indica una granulometría más gruesa.

Porcentaje pasante de la malla N°200

Norma de ensayo: ASTM C-117, determina por vía húmeda el contenido de polvo o material más fino que pase la abertura del tamiz normalizado N° 200.

Según la norma ASTM C-33, el límite máximo de pasante de malla N° 200 es 5%.

Contenido de humedad

Los agregados en el proyecto pueden encontrarse en cuanto a humedad se refiere en 4 condiciones:

- Totalmente secos.
- Semi secos (algo de humedad, pero menos que la necesaria para saturarse).
- Saturado, pero superficialmente secos (condición ideal en que los agregados ni añaden ni quitan agua a la mezcla).
- Húmedos o mojados (conteniendo entre sus partículas más agua que la necesaria para saturarse).

Cuando el material contiene una cierta cantidad de humedad estos agregan agua a la mezcla por lo que se deberá tener una consideración especial en el diseño ya que podría reducir la resistencia del concreto mientras una humedad baja dificultaría la trabajabilidad deseada. El contenido de humedad inherente a los agregados debe estar entre 2% y 5%.

Porcentaje de absorción

Se describe como el volumen de agua que retiene el árido tras ser sumergido en agua durante 24 horas. El valor se da como un porcentaje del peso del material en estado seco que es capaz de absorber, de tal manera que el material queda superficialmente seco pero saturado internamente.

Peso unitario

Se refiere al peso del agregado, medido en kilogramos, que ocupa un volumen de 1 metro cúbico en el concreto, teniendo en cuenta los espacios vacíos entre las partículas.

Norma de ensayo ASTM C-138, determina el peso unitario y rendimiento del shotcrete mediante el método de ensayo gravimétrico.

Agua

El agua ingresa al concreto proyectado como agua agregada durante la producción de este y como humedad inherente del agregado. La consistencia (plasticidad) de la mezcla es regulada por el agua y los aditivos del concreto proyectado. El agua de la mezcla no debe incluir componentes que puedan retardar o acelerar la hidratación. Estos son principalmente:

- Aceite y grasa
- Cloruros
- Sulfatos
- Azúcar
- Sal

Normalmente las aguas que escurren tales como agua del subsuelo, agua de lluvias, agua de ríos y lagos, son apropiadas. No se debe usar de mar por su alto contenido de cloruros. El agua potable es generalmente apropiada para la producción de concreto proyectado.

2.5. ADITIVOS

Los aditivos constituyen componentes fundamentales en la formulación del shotcrete, ya que permiten modificar y optimizar propiedades específicas de la mezcla fresca y endurecida, en función de las condiciones de aplicación y de los requerimientos operativos. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018) define los aditivos como cualquier producto químico o mineral que se incorpora al concreto con el propósito de alterar

una o más de sus propiedades, tales como el tiempo de fraguado, la trabajabilidad, la resistencia mecánica o la durabilidad.

Los aditivos se emplean para mejorar o modificar las propiedades del concreto, que son imposibles de controlar, o de controlar debidamente, con el cemento, los agregados y el agua. También se agregan aditivos durante el proceso de proyectado para regular el inicio de fraguado. Los aditivos que se agregan al concreto lo convierten en un complejo sistema de múltiples materiales.

Los aditivos se agregan al concreto proyectado como porcentaje del peso del cemento o ligante, en un rango aproximado del 0.5% al 7%. Esto produce cantidades de 2 hasta 32 kg/m³, en milésimas partes de volumen total del concreto.

Todos los aditivos se le incorporan al concreto durante la producción en la planta mezcladora, luego de la medición inicial del agua. La principal excepción es los superfluidificantes y acelerantes, que se agregan inmediatamente antes del proyectado.

Los aditivos para hormigón proyectado son objeto de la norma ASTM C1141, que clasifica estos aditivos en categorías y establece los requisitos ASTM que deben seguir para su uso en hormigón proyectado.

Los aditivos son utilizados principalmente para mejorar una o varias de las siguientes características del concreto:

- Aumentar la trabajabilidad, sin modificar el contenido de agua.
- Retardar o acelerar el tiempo de fraguado inicial.
- Acelerar la resistencia temprana.
- Modificar la velocidad de producción de calor de hidratación.
- Reducir la exudación y sangrado.
- Incrementar la durabilidad o resistencia en condiciones severas de exposición.
- Disminuir la segregación.
- Mejorar la adherencia del concreto con el refuerzo.

En el shotcrete utilizado en minería subterránea, particularmente en operaciones ubicadas en zonas de gran altitud y bajas temperaturas como la Unidad Minera Inmaculada, el uso adecuado de aditivos es determinante para garantizar un rápido desarrollo de resistencia temprana, una correcta adherencia al macizo rocoso y una aplicación eficiente del material. Según Sánchez y Tapia (2019), los aditivos más comúnmente empleados en el shotcrete son los acelerantes, los incorporadores de aire, los reductores de agua (plastificantes y superplastificantes) y los retardadores.

2.5.1. Tipos de aditivos

Los aditivos son considerados de acuerdo a la norma de acuerdo a la siguiente clasificación.

- Plastificante, reductor de agua. Mejora la consistencia del concreto y reduce la cantidad de agua mezclado requerida para producir concreto de consistencia predeterminada.
- Retardador. Que alarga el tiempo de fraguado del concreto.
- Acelerador. Que acorta el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto.
- Plastificante y retardador. Que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto con una consistencia dada y retarda el fraguado.
- Plastificante y acelerador. Que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto con una consistencia dada y acelera su fraguado y el desarrollo de su resistencia.
- Incorporadores de aire. Aumenta la resistencia del concreto a la acción de las heladas porque introduce burbujas diminutas en la mezcla de cemento endurecida. Estas burbujas actúan como amortiguadores para los esfuerzos inducidos por la congelación y descongelación.
- Adhesivos. Que mejora la adherencia con el refuerzo.

2.5.1.1. Aditivos acelerantes

Los aditivos acelerantes se utilizan principalmente para acelerar el fraguado normal del shotcrete y promover el desarrollo de resistencia inicial, lo cual resulta crítico en el

sostenimiento temprano de excavaciones subterráneas. De acuerdo con la Guía Chilena de Hormigón Proyectado (2015), estos aditivos permiten que el concreto proyectado alcance resistencias suficientes en las primeras horas posteriores a su aplicación, reduciendo el riesgo de desprendimientos de roca y posibilitando el reingreso seguro del personal.

En el contexto de la Unidad Minera Inmaculada, donde las temperaturas ambientales bajas pueden retardar las reacciones de hidratación del cemento, el uso de acelerantes como el MR-193 adquiere especial relevancia, ya que contribuye a compensar los efectos negativos del clima sobre la resistencia temprana del shotcrete. No obstante, una sobredosificación del acelerante puede generar efectos adversos, tales como una disminución de la resistencia final o problemas de durabilidad, por lo que es indispensable respetar las recomendaciones técnicas del fabricante y realizar un control adecuado de la dosificación (Guía Chilena de Hormigón Proyectado, 2015).

2.5.1.2. Aditivos reductores de agua (plastificantes y superplastificantes)

Los aditivos reductores de agua, también conocidos como plastificantes y superplastificantes, permiten mejorar la trabajabilidad del shotcrete manteniendo un contenido fijo de agua o, alternativamente, reducir la relación agua/cemento sin afectar la consistencia de la mezcla (Sánchez & Tapia, 2019). Esta reducción de agua es fundamental para incrementar la resistencia temprana y final, así como para mejorar la durabilidad del material.

En particular, los superplastificantes a base de policarboxilatos han demostrado un desempeño superior frente a aditivos de generaciones anteriores, ya que actúan dispersando eficazmente las partículas de cemento aglomeradas, lo que mejora la hidratación y la eficiencia del sistema cementante. Liu et al. (2021) señalan que estos aditivos permiten incrementos significativos en la resistencia temprana, además de mejorar la trabajabilidad y reducir la porosidad del concreto endurecido.

En minería subterránea, el uso combinado de superplastificantes y acelerantes, como en el caso del shotcrete con MR-193 evaluado en esta investigación, constituye una estrategia técnica para optimizar el desempeño mecánico del sostenimiento, reducir el consumo de cemento y minimizar el rebote, lo que se traduce directamente en una optimización de los costos operativos.

En la Tabla 4 se presenta un comparativo del desempeño de distintos tipos de aditivos plastificantes, considerando su capacidad de reducción de agua y el incremento promedio de resistencia a edades tempranas, evidenciando la superioridad de los aditivos de base policarboxilato en términos de eficiencia.

Tabla 4. Límites de clasificación para agregados combinados.

Tipo de aditivo plastificante	Peso de cementante (%)	Capacidad de reducción de agua (%) – Pasta de cemento	Capacidad de reducción de agua (%) – Mezcla de concreto	Promedio de incremento de resistencia en un día (%) – Probeta de cemento	Promedio de incremento de resistencia en un día (%) – Probeta de concreto
Lignosulfato	0.2	7 – 10	8 – 12	8 – 14	10 – 15
Plastificante Sika	0.3	9	10 – 12	9 – 18	10 – 20
Naftalina	0.35	10 – 13	12 – 15	10 – 22	10 – 20
Formaldehído (S-3)	0.5	15 – 16	16 – 18	16 – 31	15 – 30
Formaldehído (S-3)	0.7	18 – 21	18 – 20	32 – 48	29 – 49
Mapei Dynamon SP3	0.2	28 – 31	30 – 35	40 – 58	42 – 60
Mapei Dynamon SP3	0.35	39 – 42	40 – 45	55 – 85	60 – 90
Mapei Dynamon SR3	1	20 – 25	22 – 28	40 – 55	38 – 52
Mapei Dynamon SR3	1.5	26 – 32	30 – 35	40 – 58	38 – 55
Melflux 2651F	0.5	30 – 32	30 – 35	42 – 63	40 – 60
Melflux 2651F	1	38 – 42	40 – 45	60 – 90	57 – 89

Nota: Adaptada de ACI 506R (2016).

2.6. ADITIVOS INCORPORADOS EN EL DISEÑO DE SHOTCRETE EN LA UNIDAD MINERA INMACULADA

En la unidad minera se hace uso de aditivos hiperplastificantes reductores de agua y acelerantes para el fraguado del shotcrete, con la finalidad de mejorar y optimizar la productividad en la unidad se opta por los últimos productos que hay en el mercado.

En los últimos años en la unidad minera se estuvo usando el aditivo acelerante MR-160 hasta mediados del año 2024, en donde se opta en remplazar en el diseño de shotcrete y realizar las pruebas con MR-193 que es la versión más moderna y optimizada del acelerante anterior, con la finalidad de obtener una resistencia temprana mayor de 2 MPa a las 2 horas de fragua, luego reingresar al frente y continuar con el ciclo de minado, de obtenerse resultados positivos en las resistencias iniciales se procede con la gestión de cambio.

2.6.1. Aditivo acelerante a emplear en el nuevo diseño Master Roc – 193

Es un acelerante de alto desempeño libre de álcali, para hormigón proyectado, cuya dosificación puede variar según el ajuste y tiempo de endurecimiento deseados.

Usos

- Sostenimiento temporal y permanente de túneles civiles y minería.
- Estabilización de taludes.
- Igualmente, acelerar lechadas de cemento (grots) para proyección de terrenos y proyección de morteros aligerados.

Características / ventajas

- Master Roc SA 193 está diseñado idealmente para hormigón proyectado por vía húmeda para sostenimiento temporal y definitivo del terreno.
- La propiedad de rápido fraguado permite un mejor ciclo de avance y la capacidad de aplicar grandes espesores de hormigón en una sola capa.
- Su formulación única permite un fraguado rápido con un desarrollo continuo de resistencia iniciales y finales, mejorando la durabilidad del hormigón proyectado.

- Mínima generación de polvo durante la aplicación y por lo tanto optimo ambiente de trabajo.
- Mejora el rebote si se utiliza a un correcto ángulo y distancia de tobera de proyección.
- Las propiedades no agresivas proporcionan mayor seguridad, reducción del impacto ambiental y reducción de los costos de manejo.

Procedimiento de aplicación

El sustrato debe estar limpio exento de partículas sueltas y preferentemente húmedo.

Se recomienda utilizar solamente cemento fresco ya que el cemento almacenado durante mucho tiempo puede originar influencias negativas en las propiedades de fraguado de la mezcla.

Master ROC -193 puede ser sensible al tipo de cemento. Con algunos cementos las características de fraguado pueden ser demasiada lentos. Se recomienda el uso de cementos Portland (OPC/HEC), que normalmente dan un ajuste más rápido, que los cementos adicionados o sulfo-resistentes.

Sin embargo, Master Roc -193 también funciona bien con cementos compuestos (cementos adicionados, cenizas/escoria).

En todos los casos se recomienda realizar ensayos preliminares con los cementos planeados a utilizar en el proyecto dado, comprobando fraguados y resistencias a 24 horas.

La evaluación de fraguados y resistencias temprana deben ser efectuadas mediante el ensayo en mortero de acuerdo de acuerdo con la especificación para hormigón proyectado EFNARC (1996) anexo 1, clausula 6.3.

Los siguientes resultados deben ser tomados solamente como guía orientativa de trabajo.

Tabla 5. Valoración de la resistencia según al tiempo de fraguado.

Inicio de fraguado	Final de fraguado	Resistencia a las 24 h	Clasificación
2 min	6 – 8 min	18 – 20 MPa	Buena
5 min	8 – 12 min	12 -15 MPa	Aceptable
> 10 min	>15 min.	< 10 MPa	No aceptable

Nota: hoja de datos del producto Master Roc 193

2.7. DISEÑO DE SHOTCRETE

Clará, P.A.; Montes, R.A; Morales, J.A. (2006), en su tesis “Concreto lanzado: Diseño de mezcla y propuesta de metodología para el control de calidad”, abordan el proceso de diseño del shotcrete, enfatizando que este proceso implica la cuidadosa combinación de varios insumos del concreto, incluyendo agregados, agua, cemento, aditivos y fibras, en proporciones predefinidas con un objetivo específico. Subrayan que no se trata de una mezcla aleatoria de materiales, sino de un proceso altamente controlado.

En el contexto del concreto lanzado, el diseño de shotcrete se enfoca fundamentalmente en la resistencia a la compresión. Las variaciones en la resistencia, explican, dependen en gran medida de tres factores principales: el proceso de revestimiento, el tipo de equipo empleado y la calidad de la mano de obra. Estos elementos influyen en la calidad del resultado final.

En cuanto a la dosificación de la mezcla, los autores mencionan dos enfoques distintos. Uno se basa en especificar la calidad requerida y permite al constructor decidir cómo cumplirla, generalmente definiendo la calidad de los insumos y la resistencia a la 10 compresión. El segundo enfoque, la dosificación por prescripción, en este caso se limita a indicar la calidad de los insumos y su relación en masa, como ejemplo, la relación cemento áridos de 1:4. Para mezclas por vía húmeda, se agregan requisitos adicionales, como el slump y el contenido de aire de ser necesario. Estos enfoques proporcionan directrices clave para la preparación de la mezcla de shotcrete de manera eficaz y precisa.

Melbye, T. (2002), en su libro “Shotcrete para soporte de rocas”, especifica que los siguientes componentes deben estar presentes para que la técnica húmeda genere un hormigón proyectado eficaz:

- Aridos
- Cemento
- Aceleradores de fragua líquidos sin álcalis
- Fibras
- Aditivos
- Microsílice
- El tratamiento posterior
- Equipo de proyección adecuado
- Adopción de una técnica adecuada

A continuación, mencionaremos factores específicos que pueden influir en la calidad de un concreto. Como ya se ha señalado, el concreto proyectado debe cumplir las mismas especificaciones del concreto empleado en la construcción, concretamente:

- Disminuir de la proporción a/c
- Menor cemento
- Menor agua
- Mejorar la trabajabilidad

En el caso del concreto proyectado, los contrastes en las características del concreto fresco y endurecido son especialmente evidentes. Esto reduce nuestra calidad de concreto proyectado producido por vía húmeda, sin embargo, puede minimizarse utilizando aditivos, fibras y microsílice que absorban menos agua.

2.7.1. Principales propiedades del shotcrete

Las principales propiedades del shotcrete comprenden el conjunto de características físicas, mecánicas y de adherencia que determinan su desempeño como elemento de sostenimiento en minería subterránea. Estas propiedades incluyen la resistencia temprana y

final, la adherencia al sustrato, la densidad y la permeabilidad, las cuales influyen directamente en la estabilidad de las excavaciones, la seguridad operativa y la optimización de los costos de sostenimiento. Su adecuado control permite garantizar un comportamiento estructural eficiente del shotcrete bajo condiciones geomecánicas y ambientales exigentes (ACI Committee 506, 2016; Hoek & Brown, 2019).

2.7.1.1. Resistencia temprana

La resistencia temprana constituye una de las propiedades más relevantes del shotcrete, especialmente en minería subterránea, donde se requiere una rápida estabilización del macizo rocoso tras la excavación. Esta propiedad resulta crítica cuando se aplican capas de gran espesor o cuando existen condiciones adversas como filtraciones de agua, bajas temperaturas o excavaciones de gran sección.

El desarrollo de la curva de resistencia durante los primeros minutos posteriores a la aplicación influye directamente en la adherencia inicial del material, el control del rebote y la reducción de la generación de polvo, aspectos que inciden tanto en la seguridad operativa como en la eficiencia económica del proceso. La resistencia temprana del shotcrete suele evaluarse en intervalos comprendidos entre los primeros 6 y 60 minutos, realizando mediciones posteriores de forma horaria (Linares, 2018).

Entre los métodos más empleados para su determinación se encuentra el penetrómetro de aguja, utilizado para medir resistencias comprendidas entre 0.2 y 1.2 MPa, y el método de hincado de clavos con pistola Hilti, aplicable para rangos de resistencia entre 3 y 16 MPa. Estos ensayos permiten verificar el desempeño inicial del shotcrete y evaluar la eficiencia de los aditivos acelerantes empleados, como el MR-193, en condiciones reales de operación minera (Linares, 2018).

2.7.1.2. Resistencia final

La resistencia final del shotcrete está estrechamente relacionada con la cantidad de agua incorporada a la mezcla, específicamente con la relación agua/cemento (A/C). Un exceso de agua genera una mayor porosidad en la matriz cementicia, ya que durante el fraguado y endurecimiento el agua sobrante se evapora, dejando vacíos que reducen la resistencia mecánica y la durabilidad del material.

Para una adecuada hidratación del cemento, se requiere una relación A/C cercana a 0.25; sin embargo, en el caso del shotcrete esta relación varía según el nivel de exigencia estructural y operativa de la excavación. De acuerdo con Linares (2018), la relación A/C en shotcrete se clasifica de la siguiente manera:

- Para bajas exigencias: $A/C < 0.55$
- Para exigencias medias: $A/C < 0.50$
- Para altas exigencias: $A/C < 0.46$

En minería subterránea, donde el shotcrete cumple funciones estructurales y de sostenimiento permanente, se priorizan relaciones A/C bajas, apoyadas por el uso de aditivos superplastificantes, con el fin de alcanzar altas resistencias finales sin comprometer la trabajabilidad.

2.7.1.3. Adhesión

La adhesión es la capacidad del shotcrete de fijarse firmemente a la superficie de contacto, ya sea roca, concreto o acero. Esta propiedad es fundamental para garantizar la efectividad del sostenimiento, ya que una adecuada adherencia permite que el shotcrete actúe solidariamente con el macizo rocoso, distribuyendo tensiones y evitando desprendimientos locales.

El shotcrete presenta una elevada capacidad de adhesión debido a su aplicación a alta velocidad, lo que favorece la compactación y el anclaje mecánico del material sobre

superficies irregulares. Fernández (2020) señala que una correcta preparación del sustrato y el control de la mezcla son factores determinantes para maximizar esta propiedad, especialmente en ambientes mineros de alta humedad y altitud.

2.7.1.4. Alta densidad y baja permeabilidad

El shotcrete correctamente dosificado y aplicado desarrolla una alta densidad, lo que se traduce en una baja permeabilidad al agua y agentes agresivos. Esta característica resulta esencial en minería subterránea, donde las estructuras están expuestas a condiciones severas, como filtraciones, ciclos de congelamiento y descongelamiento, y presencia de agentes químicos.

Una baja permeabilidad limita el ingreso de agua al interior del material, reduciendo procesos de deterioro y aumentando la durabilidad del sostenimiento. Según Fernández (2020), la alta densidad del shotcrete contribuye significativamente a prolongar su vida útil y a disminuir los costos de mantenimiento y rehabilitación en labores mineras permanentes.

2.7.2. Resistencia temprana del shotcrete en UM Inmaculada.

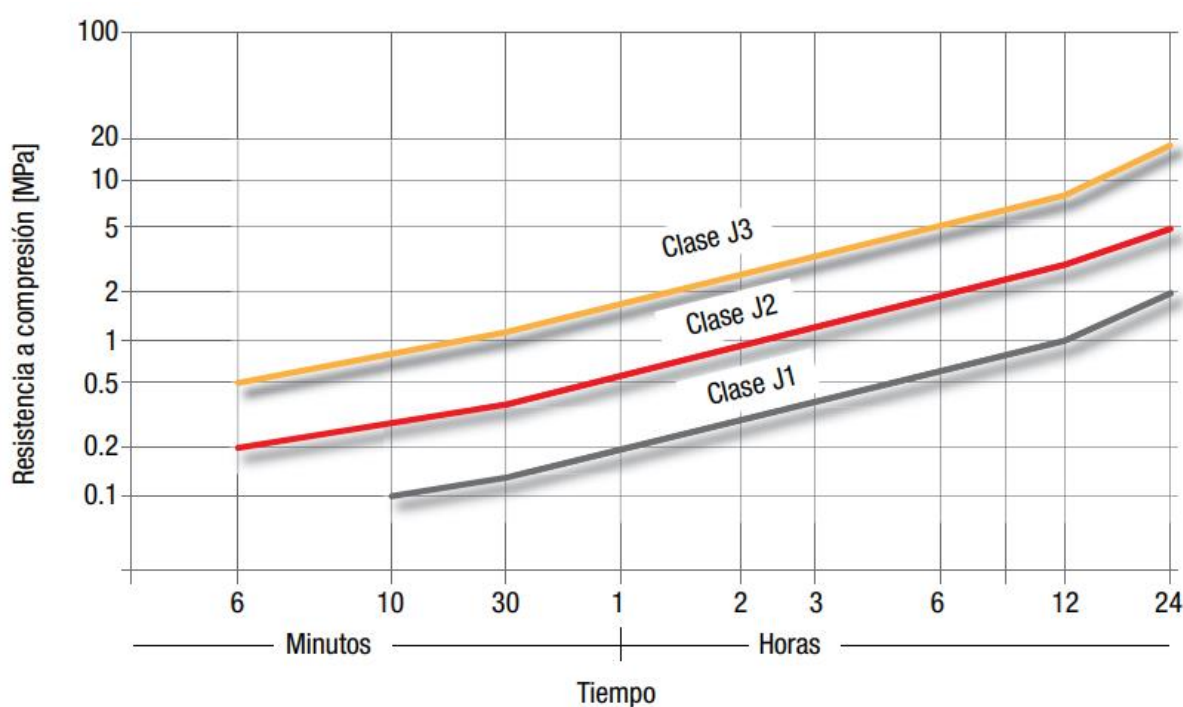
Es la capacidad mecánica inicial del concreto lanzado para soportar esfuerzos de compresión en un periodo reducido después de su aplicación, determinando el momento en que el revestimiento pueda aceptar cargas estructurales y garantizar la seguridad en el frete de trabajo (American Concrete Institute ACI, 2023; Malca, 2019).

El tiempo necesario para el fraguado es el tiempo que transcurre desde que se hace la mezcla de agua y cemento hasta que alcanza la resistencia deseada. La resistencia inicial de fragua del hormigon se especifica en 500 lb/pulg² (o 35kg/cm²), mientras que la resistencia final de fraguado se define en 4000 lb/pulg² (o 250 kg/cm²). La NTP 339.082 regula este atributo en Peru, mientras que la ASTM C403 lo hace a nivel mundial.

2.7.2.1. Las curvas J

Las clases de resistencia J1, J2 y J3 representan categorías para clasificar la resistencia del hormigón proyectado, la forma de estas curvas se puede apreciar en la siguiente figura 10. El hormigón J1 es adecuado para la colocación de capas delgadas sobre una superficie seca y sin requisitos especiales de soporte de carga, obteniendo como ventaja la baja formación de polvo y rebote. El hormigón J2 se utiliza cuando se va a colocar capas gruesas con un alto rendimiento, también cuando se necesitan resistencias altas en poco tiempo. J3 solo se debe especificar en circunstancias especiales (por ejemplo, una fuerte entrada de agua) debido a la gran formación de polvo y rebote. (Sprayed concrete Guía austriaca, 2013).

Figura 10. Clases de resistencia temprana del hormigón proyectado.



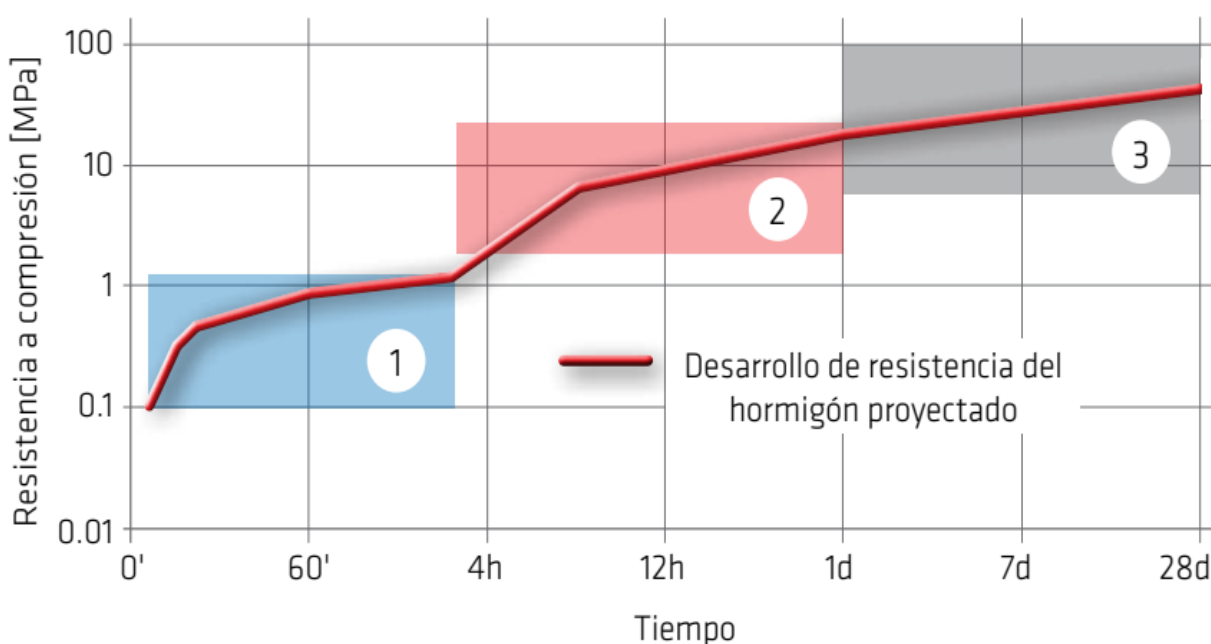
Nota: Adaptada de la normativa EN14487-1

2.7.2.2. Métodos de medición

La resistencia a la compresión inicial y temprana del hormigón proyectado, es hasta las 24 horas, se mide por métodos indirectos mediante penetrómetro y perno Hilty. ambos métodos correlacionan el impacto de la resistencia a la compresión en la penetración de una

aguja. debe tomarse en cuenta que, aparte de cualquier recomendación aportada por lo estipulado por este método o las normas locales (folleto Hilti, en 14488-2, etc.) cualquier función de correlación general que describa estos impactos es tan solo una aproximación. por lo tanto, el resultado de estos métodos depende del diseño de la mezcla, esto es, de los agregados usados (0 - 8 mm) y no necesariamente dan valores absolutos de resistencia a la compresión.

Figura 11. Desarrollo de la resistencia del shotcrete.



Nota: Adaptado de Manual Sika sobre hormigón proyectado.

La medición de la resistencia a la compresión total del hormigón proyectado requiere tres métodos.

Figura 12. Métodos de medición de la resistencia temprana.

Desarrollo de		Método	Instrumento	Resistencia	Tiempo
1	Resistencia inicial	Penetración aguja	Penetrómetro	hasta 1.5 MPa	0 - 3 h
2	Resistencia temprana	perforación perno	Hilti DX 450-SCT	3 - 20 MPa	3 - 24 h
3	Resistencia final	Toma de núcleo	Máquina de prueba compresión	5 - 100 MPa	1 - 28 d

Nota: Adaptado de Manual Sika sobre hormigón proyectado.

A. Método de la penetración de la aguja.

Este método se utiliza para medir la fuerza requerida para empujar una aguja de dimensiones específicas para que penetre en el hormigón proyectado hasta una profundidad de $15\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$. Un penetrómetro indica la fuerza realizada, por compresión de un muelle calibrado, del cual puede deducirse la resistencia a compresión estimada a partir de una curva de conversión, que es suministrada por el fabricante del equipo de ensayo.

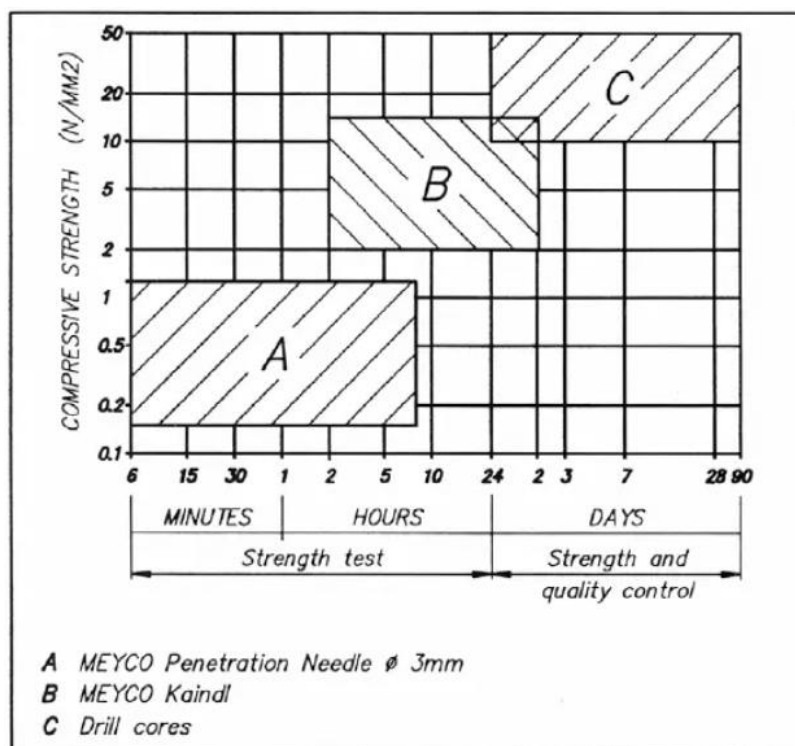
El penetrómetro es capaz de introducir la aguja dentro de la superficie y registra la fuerza requerida con una exactitud de 10N. el penetrómetro debe proporcionarse con una curva de calibración certificada, capaz de correlacionar las lecturas con las resistencias a compresión estimada. La aguja cuenta con un diámetro de $3\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ y una punta con un ángulo de filo de $(60 \pm 5)^\circ$ y formulario del protocolo de ensayo, para registrar todos los datos del ensayo.

Figura 13. Penetrómetro Proctor.



Nota: Adaptado de Manual de instrucciones de MEYCO.

Figura 14. Rango operativo habitual de las técnicas de medición.



Nota: Adaptado de Manual de instrucciones de MEYCO.

B. Método de perforación con perno (Hilti)

Se clava un clavo dentro del hormigón proyectado y se determina la profundidad de la penetración del mismo. A continuación, se extrae el clavo y se mide la fuerza de extracción y la profundidad de penetración puede utilizarse para obtener una resistencia a compresión estimada a partir de la curva de conversión, que es suministrada por el fabricante por el equipo de ensayo.

Se hace uso del equipo Hilti DX 450 para insertar el clavo en el hormigón proyectado lo cual debe ser capaz de lanzar el clavo de hasta una profundidad de al menos 20mm, para luego hacer uso del equipo de extracción, que aplica una fuerza de atracción al clavo transmitiendo la reacción a la superficie del hormigón a través de un anillo de sujeción. El equipo debe contar con el dispositivo que registra la fuerza máxima aplicada.

Figura 15. Pistola de clavos accionado por pólvora HILTI DX 450.



Nota: Adaptado de Manual de instrucciones HILTI DX 450.

2.8. COSTOS OPERATIVOS EN LA MINERÍA

Según el Ministerio de Energía y Minas (2003), son los gastos que se realizar para el pago del salario en planilla y de la misma forma de los restos de los gastos que están directamente relacionado a la operación, se podría decir que los costos son los gastos incurridos como la limpieza del material roto, en los elementos de sostenimiento como Split set y la malla de sostenimiento con fines de realizar las actividades de operación en la unidad minera.

Para Jáuregui (2009), los costes operativos son definidos, por los gastos incurridos directamente en el área del trabajo, para la operación directa en los trabajos mineros de operación los costos en transporte, costos en sostenimiento, costos en limpieza y los costos en mano de obra y demás actividades que están sujetas directamente a la operación de trabajo.

2.8.1. Optimización de los costos operativos

Los costos operativos en operaciones de fraguado con hormigón proyectado son un aspecto crítico en la minería subterránea (Rojas y Zúñiga, 2020). A continuación, se detallan los factores clave que influyen en estos costos:

- Costos de Materiales, comprende:
 - Cemento y agregados: el costo del cemento y los agregados es

fundamental, representando una parte significativa del costo total. Por ejemplo, el costo de elaboración de concreto puede ser de aproximadamente \$160 por m³.

- Aditivos: la inclusión de aditivos como fibras y acelerantes también afecta el costo, pero puede mejorar la calidad del shotcrete y reducir el rebote, optimizando así el uso de material.
- Costos de Transporte, estos incluyen:
 - Transporte a Interior Mina: El transporte del hormigón proyectado desde la planta hasta el sitio de aplicación es un factor importante. Se ha observado que la instalación de plantas de hormigón proyectado en el interior de la mina puede reducir significativamente los costos de transporte, ahorrando hasta \$12.46 por viaje.
 - Distancia y Accesibilidad: La distancia desde la planta hasta el área de trabajo influye en los costos operativos. La construcción de una planta cercana puede disminuir los tiempos y costos asociados al transporte.
- Costos de Mano de Obra
 - Operación Eficiente: El uso de equipos robotizados para la proyección de hormigón proyectado puede reducir la necesidad de mano de obra, generando ahorros significativos en comparación con métodos manuales¹. Se estima que el uso de tecnología avanzada puede resultar en un ahorro del 54% en costos de recambios y una reducción notable en los gastos laborales.

2.9. DEFINICION DE TÉRMINOS

Shotcrete

El shotcrete es un concreto o mortero proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre superficies rocosas o estructurales, permitiendo su colocación sin encofrado. Es ampliamente utilizado en minería subterránea por su rápida ganancia de resistencia y capacidad de estabilización inmediata del macizo rocoso (ACI Committee 506, 2016).

Resistencia temprana

La resistencia temprana corresponde a la capacidad mecánica que desarrolla el shotcrete en las primeras horas posteriores a su aplicación, generalmente dentro de las primeras 24 horas. Este parámetro es crítico para garantizar la estabilidad inicial de excavaciones subterráneas y la seguridad operativa (Neville, 2011).

Aditivo acelerante

Un aditivo acelerante es un producto químico incorporado al shotcrete para reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de resistencia inicial. Su uso es esencial en minería subterránea, especialmente en zonas de baja temperatura, donde se requiere soporte inmediato (ACI Committee 506, 2016).

MR-193

El MR-193 es un aditivo químico acelerante de fraguado y endurecimiento diseñado para mejorar la resistencia temprana del shotcrete. Su aplicación permite optimizar los tiempos de sostenimiento, reducir ciclos de espera y contribuir a la disminución de costos operativos en minería subterránea (Sika, 2022).

MR-160

El MR-160 es un aditivo acelerante tradicionalmente utilizado en shotcrete para minería, orientado al fraguado rápido. Sin embargo, su desempeño en resistencia temprana puede verse limitado frente a nuevas formulaciones, lo que motiva su evaluación comparativa con aditivos de última generación como el MR-193 (Sika, 2021).

Sostenimiento minero

El sostenimiento minero es el conjunto de elementos estructurales instalados en excavaciones subterráneas para controlar la estabilidad del macizo rocoso. Su

función principal es prevenir desprendimientos, deformaciones excesivas y garantizar condiciones seguras durante las operaciones mineras (Hoek & Brown, 2019).

Macizo rocoso

El macizo rocoso es el conjunto de rocas intactas y discontinuidades geológicas que conforman el medio donde se desarrollan excavaciones mineras. Su comportamiento mecánico condiciona el diseño del sostenimiento y la selección del tipo de shotcrete y aditivos empleados (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002).

Fraguado

El fraguado es el proceso físico-químico mediante el cual el cemento pierde su plasticidad y comienza a adquirir rigidez. En shotcrete, el control del fraguado es fundamental para asegurar la adherencia al sustrato y el desarrollo de resistencia inicial adecuada (Neville, 2011).

Aditivos superplastificantes

Los aditivos superplastificantes son compuestos químicos que mejoran la trabajabilidad del concreto sin aumentar la relación agua/cemento. En shotcrete, permiten obtener mezclas más fluidas, homogéneas y con mayores resistencias mecánicas, especialmente en aplicaciones subterráneas (Liu et al., 2021).

Relación agua/cemento

La relación agua/cemento es el cociente entre la cantidad de agua y cemento en una mezcla de concreto. Este parámetro influye directamente en la resistencia, durabilidad y permeabilidad del shotcrete, siendo crucial para lograr altas resistencias tempranas (Mehta & Monteiro, 2014).

Rebote

El rebote es la fracción de material proyectado que no se adhiere a la superficie durante la aplicación del shotcrete. Un rebote elevado incrementa el desperdicio de material y los costos operativos, por lo que su control es un criterio clave en el diseño de mezclas (ACI Committee 506, 2016).

Granulometría

La granulometría es la distribución del tamaño de partículas de los agregados utilizados en el shotcrete. Una granulometría adecuada mejora la cohesión, reduce

el rebote y optimiza la resistencia temprana, siendo un factor determinante en el desempeño del sostenimiento minero (Sánchez & Tapia, 2019).

Agregados

Los agregados son materiales granulares, como arena y grava, que constituyen la mayor proporción volumétrica del shotcrete. Su calidad, forma y tamaño influyen directamente en la trabajabilidad, resistencia mecánica y durabilidad del concreto proyectado (MTC, 2018).

Cemento Portland

El cemento Portland es un material hidráulico obtenido por la molienda de clinker y yeso, responsable de la resistencia del shotcrete. En minería subterránea, se selecciona según la necesidad de resistencia temprana, durabilidad y condiciones ambientales extremas (MTC, 2018).

Fibras de refuerzo

Las fibras de refuerzo son elementos discretos incorporados al shotcrete para mejorar su comportamiento post-fisuración. Incrementan la capacidad de absorción de energía, resistencia a flexión y controlan la propagación de grietas en excavaciones subterráneas (Aire & Aguilar, 2021).

Optimización de costos operativos

La optimización de costos operativos consiste en la reducción eficiente de gastos asociados a los procesos productivos mineros. En el shotcrete, se logra mediante el uso de aditivos que aceleran la resistencia temprana, reducen tiempos muertos y minimizan consumo de materiales (Salvador et al., 2019).

Estabilidad de excavaciones

La estabilidad de excavaciones se refiere a la capacidad de una labor minera para mantenerse segura y funcional sin colapsos. Depende del macizo rocoso, el diseño del sostenimiento y la resistencia temprana del shotcrete aplicado (Hoek & Brown, 2019).

Minería subterránea

La minería subterránea es el conjunto de operaciones destinadas a la explotación de yacimientos mediante excavaciones bajo la superficie. Requiere sistemas de

sostenimiento eficientes como el shotcrete, especialmente en condiciones de alta altitud y bajas temperaturas (Hartman & Mutmansky, 2002).

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Desde el enfoque metodológico, el método científico constituye un proceso sistemático y ordenado que permite generar conocimiento válido a partir de la observación de fenómenos, la formulación de hipótesis, la recolección y análisis de datos, y la verificación empírica de resultados. Según Hernández Sampieri et al. (2014), el método científico se sustenta en la medición objetiva y el análisis lógico de la información, permitiendo explicar relaciones causales entre variables mediante procedimientos controlados y replicables. De manera similar, Tamayo y Tamayo, (2016) señalan que este método integra fases de observación, experimentación y síntesis, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos en investigaciones de carácter aplicado y experimental. En el ámbito de la ingeniería, el método científico es fundamental para evaluar materiales, procesos y tecnologías, ya que permite contrastar teorías con resultados obtenidos en condiciones reales o controladas.

En la presente investigación, el método científico se aplica al análisis del uso del aditivo acelerante MR-193 en el diseño del shotcrete, mediante la observación directa del proceso de aplicación en labores subterráneas, la toma sistemática de datos de resistencia temprana, la realización de ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión y el análisis comparativo de resultados. Asimismo, se emplea la síntesis de información técnica y económica para evaluar el impacto del incremento de la resistencia temprana en los tiempos de reingreso seguro al frente de trabajo y en la optimización de los costos operativos asociados

al sostenimiento con shotcrete en la Unidad Minera Inmaculada. De este modo, el método científico permite validar de manera objetiva la efectividad del aditivo MR-193 como tecnología aplicada para mejorar la seguridad, eficiencia operativa y desempeño económico del proceso de sostenimiento.

3.2. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Tipo de investigación

Desde el punto de vista metodológico, la presente investigación corresponde al tipo aplicada, debido a que se orienta a la utilización del conocimiento científico y técnico para la solución de problemas concretos del entorno real. Según Hernández Sampieri y Mendoza (2018), la investigación aplicada se fundamenta en los hallazgos de la investigación básica y se enfoca en el vínculo entre la teoría y la práctica, buscando generar resultados útiles que permitan mejorar procesos, productos o tecnologías.

En el contexto de la presente investigación, la investigación aplicada se justifica porque se orienta a resolver una problemática operativa real en la Unidad Minera Inmaculada, relacionada con los tiempos de reingreso seguro al frente de trabajo y los costos operativos del sostenimiento con shotcrete. A través de la evaluación del uso del aditivo acelerante MR-193 en el diseño del shotcrete, se busca aplicar conocimientos técnicos sobre resistencia temprana, dosificación y control de calidad para mejorar el desempeño del sostenimiento y optimizar el ciclo de minado. De este modo, los resultados obtenidos permitirán proponer soluciones técnicas viables y económicamente eficientes, contribuyendo a la mejora de la seguridad, productividad y eficiencia operativa de la unidad minera.

3.2.2. Nivel de investigación

La presente investigación se sitúa en un nivel descriptivo–comparativo, con enfoque cuantitativo, debido a que describe las características de las variables de estudio y compara sus comportamientos bajo distintas condiciones. Según Hernández Sampieri et al., (2014) la

investigación descriptiva permite especificar las propiedades, características y perfiles de fenómenos que se someten a análisis, mientras que el nivel comparativo posibilita identificar similitudes y diferencias entre grupos o situaciones a partir de datos cuantificables. Asimismo, Hurtado de Barrera, (2011) señala que el nivel comparativo se emplea cuando el investigador busca establecer contrastes objetivos entre escenarios reales, utilizando mediciones sistemáticas y análisis estadístico. En este contexto, el enfoque cuantitativo se fundamenta en la recolección de datos numéricos y su análisis mediante procedimientos estadísticos, lo que permite obtener resultados objetivos, verificables y replicables.

En el contexto de la investigación, el nivel descriptivo–comparativo se aplica al análisis de la resistencia temprana del shotcrete y de los costos operativos, comparando el desempeño del diseño convencional con el diseño que incorpora el aditivo MR-193. La información recolectada corresponde a datos numéricos, tales como valores de resistencia a la compresión temprana, tiempos de fraguado, tiempos de reingreso seguro y costos asociados a materiales, equipos y mano de obra. Estos datos serán sometidos a análisis estadístico con el propósito de identificar mejoras en el proceso de fraguado y cuantificar el ahorro monetario generado por la reducción de tiempos muertos y costos operativos. Asimismo, se emplea el método deductivo, partiendo de principios generales sobre el comportamiento del shotcrete y el uso de aditivos acelerantes, para analizar su aplicación específica en la Unidad Minera Inmaculada, permitiendo validar o refutar las hipótesis planteadas de manera objetiva.

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Desde el enfoque metodológico, la presente investigación adopta un diseño experimental, debido a que se analiza el efecto de una intervención sobre una variable, sin asignación aleatoria de los sujetos de estudio. Según Hernández Sampieri y Mendoza (2018), los diseños experimentales se caracterizan por la manipulación deliberada de la variable independiente y la observación de sus efectos en la variable dependiente, comparando

mediciones realizadas antes y después de la intervención, cuando no es posible conformar grupos equivalentes de manera aleatoria. Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en investigaciones aplicadas desarrolladas en contextos reales, como organizaciones, industrias o entornos operativos.

En la presente investigación, el diseño experimental se aplica al evaluar el desempeño del shotcrete antes y después de la incorporación del aditivo MR-193 en el diseño de mezcla. El pretest corresponde a las mediciones iniciales de resistencia temprana, tiempos de reingreso y costos operativos asociados al diseño convencional del shotcrete con el aditivo MR-160 mientras que el posttest comprende las mediciones obtenidas tras la implementación del nuevo aditivo. Esta comparación permite analizar de manera objetiva el efecto del uso del aditivo MR-193 en la resistencia temprana del shotcrete y su impacto en la optimización de los costos operativos, bajo condiciones reales de la Unidad Minera Inmaculada, garantizando la validez práctica de los resultados.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población se define como el conjunto de elementos que están siendo analizados y que comparten características particulares que los caracteriza (Hernández y Mendoza, 2018). En este estudio, se identifican dos tipos de población: la primera se refiere al proceso fraguado de shotcrete, así como a los aspectos relacionados con las operaciones previas. y los costos acarreados por al fraguado de shotcrete.

Se optará por una muestra no probabilística basada en conveniencia. Según Hernández y Mendoza (2018), los individuos u objetos de estudio son seleccionados según el criterio del investigador, con el fin de facilitar el acceso al fenómeno que se está analizando, por lo que se implementará un muestreo a conveniencia, tomando el total de la población como el total de la muestra, el corresponde a 7 labores mineras en el proceso de fraguado de shotcrete, en operaciones previas al fraguado, costos acarreados por labor.

El siguiente estudio se realiza en la Unidad Minera Inmaculada y como muestra se toma las siguientes labores NV-4290 VE-6506, NV-4280 TJ-4506 y NV-4260 SN-6424, en los cuales se realiza el lanzamiento de shotcrete incorporando el nuevo aditivo al diseño de la mezcla, para ello se hace un seguimiento en campo y plantear la masificación en todas las labores de la mina si los resultados son positivos.

3.5. TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el desarrollo de la investigación, se empleará la observación directa, una técnica que, según Pereyra (2022), permite al investigador observar y recopilar información de manera directa desde la fuente, facilitando así la recolección de datos relacionados con las variables en estudio. Además, se incluirá la revisión documental de manuales operativos para la aplicación de shotcrete como sostenimiento describir las condiciones iniciales del proceso de fraguado llevado a cabo por la empresa minera, recopilando la información en una ficha técnica lo relacionado con los materiales de la mezcla de shotcrete (anexo 2), procedimiento por labor (anexo 3), el equipamiento por actividad (anexo 4), la recopilación se hará en una duración de 8 semanas antes y después de la intervención para la mejora en el proceso de fraguado. También se recopilará información sobre los costos acarreados, haciendo uso de la ficha del anexo 5.

3.6. TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos recopilados serán procesados y analizados utilizando técnicas de estadística descriptiva, como cuadros comparativos y gráficos. Para contrastar las hipótesis, se llevará a cabo una prueba de comparación de medias entre los costos operativos antes y después de la implementación de una mejora en el proceso de fraguado, con el fin de evaluar los cambios (mejoras) en estos. Para, el mismo la información se tabulará en hoja Excel y se hará uso de software SSPS versión 26 para su procesamiento estadístico.

3.7. ASPECTOS ÉTICOS

La presente investigación se desarrolló respetando los principios éticos fundamentales de la investigación científica, garantizando la integridad académica y la transparencia en el manejo de la información. En ese sentido, se ha respetado estrictamente el derecho de autor, citando y referenciando adecuadamente todas las fuentes bibliográficas, documentos técnicos, normas y estudios previos utilizados, conforme a los lineamientos de citación académica exigidos por la universidad. Asimismo, la información técnica y operativa empleada en el estudio cuenta con los permisos de uso correspondientes, siendo utilizada únicamente con fines académicos y de investigación.

Del mismo modo, la investigación se ejecutó en cumplimiento de los lineamientos institucionales y normativas éticas de la universidad, asegurando el uso responsable de los datos y la confidencialidad de la información sensible relacionada con la operación minera. El documento final fue sometido a un control de similitud mediante el software Turnitin, obteniendo un porcentaje de coincidencia dentro del umbral permitido por la normativa institucional, lo que garantiza la originalidad del trabajo y la ausencia de plagio. De esta manera, se asegura que la investigación cumple con los estándares éticos, académicos y profesionales exigidos para la elaboración de una tesis universitaria.

3.8. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.8.1. Condiciones técnicas y control de calidad de los materiales para el diseño.

Agregados

El agregado fino utilizado en la elaboración del shotcrete corresponde a arena gruesa proveniente de la cantera SORANI, la cual es empleada de manera regular en la unidad minera Inmaculada para la producción de concreto proyectado. Dicho material fue evaluado conforme a los requisitos establecidos en la Norma ASTM C33 para agregados de concreto y la Guía

para Shotcrete ACI 506, las cuales definen los parámetros mínimos de calidad para garantizar un adecuado desempeño del concreto proyectado.

La arena gruesa destinada a la producción de shotcrete debe presentar una granulometría compatible con el sistema de aplicación vía húmeda, de modo que se asegure una adecuada facilidad de bombeo, buena trabajabilidad de la mezcla, reducción del rebote durante el lanzado y una correcta compactación del material proyectado sobre el macizo rocoso.

De acuerdo con la Guía ACI 506, el agregado fino utilizado en shotcrete debe cumplir con la Gradación N° 02, la cual se considera óptima para aplicaciones subterráneas debido a su buen comportamiento reológico y mecánico.

Para la verificación de las propiedades físicas del agregado fino y del shotcrete en estado fresco, se consideraron las siguientes normas técnicas:

- ASTM C 136: Granulometría de los agregados.
- ASTM C 127: Densidad y absorción de los agregados.
- ASTM C 117: Contenido del material más fino que el tamiz #200.
- ASTM C 566: Contenido de humedad de los agregados.

En estado fresco:

- ASTM C 172: Muestreo de concreto fresco.
- ASTM C 143: Asentamiento (Slump) de concreto fresco.
- ASTM C 1064: Temperatura del concreto fresco.
- ASTM C 231: contenido de aire del concreto fresco (método de presión).
- ASTM C 138: Peso unitario y rendimiento del concreto en estado fresco.
- EN-14488-2: Resistencias iniciales Método A Penetrometro MEYCO (Entre 0 a 1.2 MPa)
Resistencias iniciales Método B pistola Hilti (Entre 2 a 16 MPa)

Granulometría y módulo de fineza

El análisis granulométrico del agregado fino se realizó de acuerdo con las normas ASTM C702, para el muestreo de agregados, y ASTM C136, para la determinación de la distribución granulométrica. El objetivo de este ensayo fue verificar que la arena gruesa

proveniente de la cantera SORANI se encuentre dentro de los límites establecidos por la ASTM C33 y la Gradación N°02 del ACI 506.

Según la norma ASTM C33, el módulo de fineza del agregado fino para concreto debe encontrarse en el rango de 3.60 a 3.80, con el fin de garantizar una adecuada trabajabilidad y cohesión de la mezcla. En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de granulometría para tres muestras representativas del agregado fino.

Tabla 6. *Ensayo de granulometría.*

Abertura	tamices	%	%	% PASANTE ACUMULADO		
mm	ASTM	%MIN	%MAX	PRUEBA 01	PRUEBA-02	PRUEBA-03
0.5	1/2"	100	100	99.6	99.5	98.8
0.375	3/8"	90	100	96.5	97.7	96.4
0.187	#4	70	85	78.6	79.6	80.4
0.0937	#8	50	70	61.4	62.0	62.1
0.0469	#16	35	55	46.9	47.0	46.9
0.0234	#30	20	35	32.8	33.1	32.5
0.0117	#50	8	20	18.8	19.1	18.3
0.0059	#100	2	10	4.8	4.1	5.2
0	FONDO	0	0	0.0	0.0	0.0

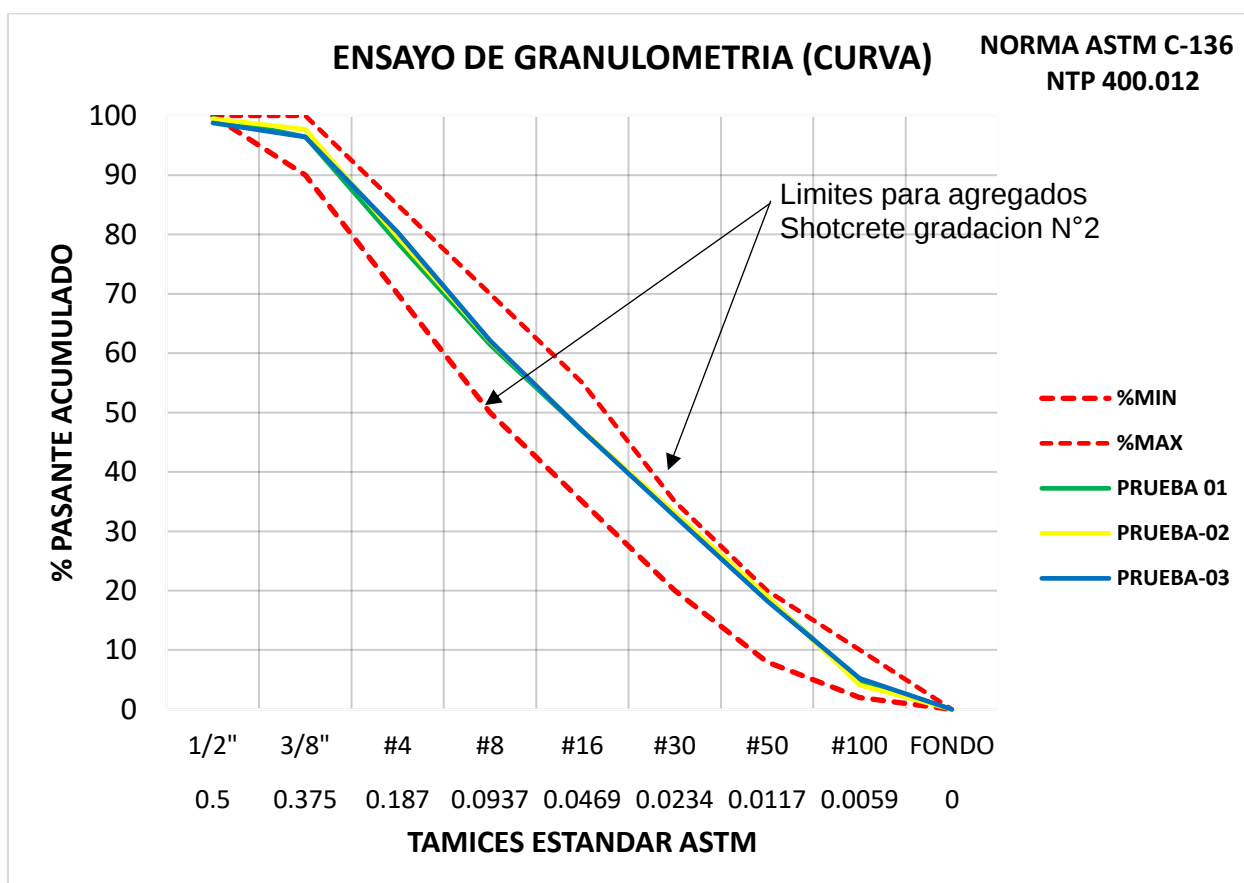
Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla N°6 Ensayo de granulometría, se observa que el agregado fino (arena gruesa) proveniente de la cantera SORANI presenta una distribución granulométrica continua y homogénea, manteniéndose dentro de los límites mínimos y máximos establecidos para la Gradación N°02 de la norma ACI 506, así como de la norma ASTM C33 para agregados destinados a la producción de concreto.

Los porcentajes pasantes acumulados registrados en las tres pruebas realizadas (Prueba 01, Prueba 02 y Prueba 03) muestran una variación mínima entre ensayos, lo que evidencia una buena uniformidad del material y un adecuado control del proceso de producción y suministro del agregado fino. Esta baja dispersión de resultados es indicativa de una cantera con características estables, condición fundamental para garantizar la repetibilidad y consistencia del shotcrete aplicado en obra.

La Figura 16 muestra la curva granulométrica correspondiente a las muestras analizadas, observándose que la distribución de partículas se mantiene mayoritariamente dentro de los límites establecidos por la normativa, lo que indica que el material es apto para su uso en shotcrete.

Figura 16. Curva granulométrica de la prueba dentro de los límites.



Nota: Elaboración propia.

Material pasante por la malla N°200 y módulo de fineza

El contenido de material más fino que el tamiz N°200 fue determinado mediante el ensayo descrito en la norma ASTM C117, el cual permite cuantificar el porcentaje de partículas finas presentes en el agregado por vía húmeda. De acuerdo con la norma ASTM C33, el límite máximo permisible de material pasante por la malla N°200 es del 5 %.

Los resultados obtenidos muestran valores ligeramente cercanos al límite normativo, con porcentajes de pasante que oscilan entre 5.53 % y 5.74 %, y módulos de fineza

comprendidos entre 3.57 y 3.60, valores que se consideran aceptables para aplicaciones de shotcrete, siempre que se mantenga un adecuado control de dosificación y contenido de agua.

Tabla 7. *Porcentaje pasante de las malla N°200 y Modulo de fineza.*

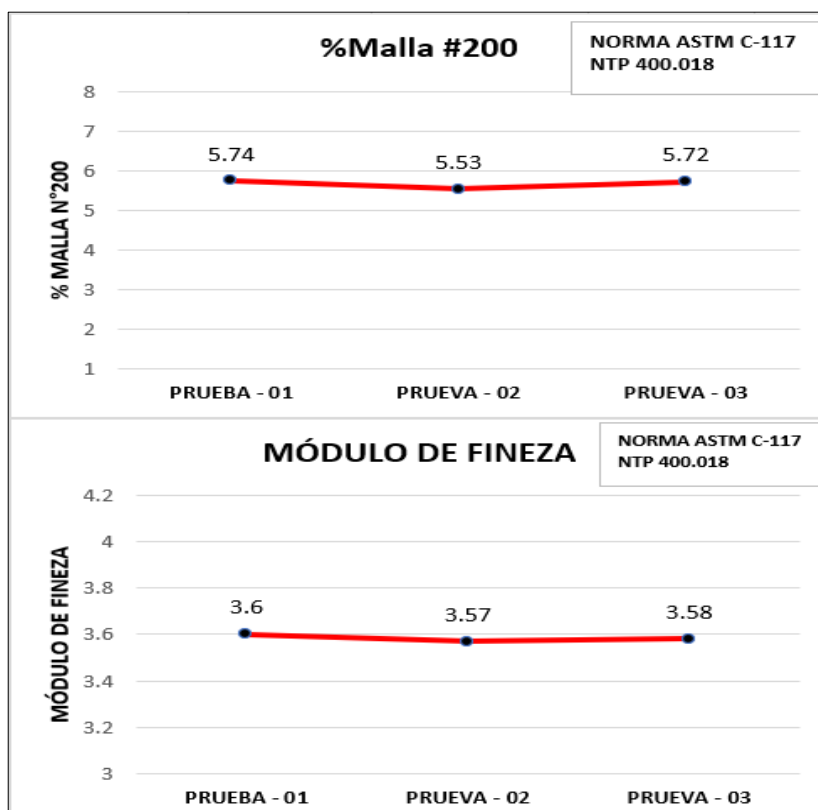
Ensayos	%Malla #200	Módulo de Fineza
PRUEBA - 01	5.74	3.6
PRUEVA - 02	5.53	3.57
PRUEVA - 03	5.72	3.58

Nota: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla 7 Porcentaje pasante malla N°200 y módulo de fineza, se observa que el agregado fino proveniente de la cantera SORANI presenta valores de material pasante por la malla N°200 entre 5.53 % y 5.74 %, los cuales se encuentran ligeramente por encima del límite máximo del 5 % establecido por la norma ASTM C33, lo que evidencia la presencia moderada de partículas muy finas. Asimismo, el módulo de fineza obtenido en las tres pruebas varía entre 3.57 y 3.60, ubicándose en el límite inferior del rango recomendado para la Gradación N°02 del ACI 506, lo cual indica una arena relativamente fina. Esta condición, si bien puede incrementar la demanda de agua y aditivo, resulta favorable para la cohesión, trabajabilidad y adherencia del shotcrete proyectado, especialmente en aplicaciones subterráneas, siempre que se mantenga un adecuado control del diseño de mezcla y del contenido de humedad del agregado, evitando efectos negativos sobre la resistencia temprana y el desempeño mecánico del material.

La Figura 17 ilustra la variación del agregado fino de la cantera SORANI en relación con la granulometría y el contenido de material pasante por la malla N°200.

Figura 17. Agregado de Sorani variación en la granulometría y malla #200.



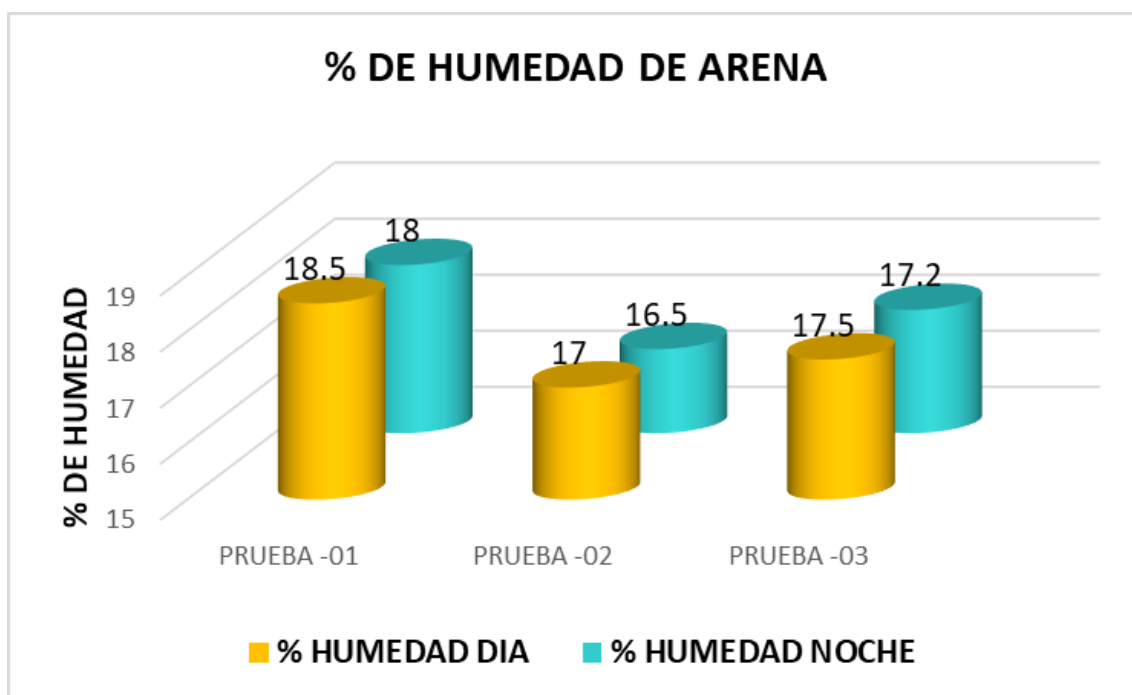
Nota: Elaboración propia.

Contenido de humedad del agregado fino

El contenido de humedad del agregado fino fue determinado conforme a la norma ASTM C566, mediante el método de secado por calentamiento directo. Este parámetro resulta fundamental para realizar las correcciones necesarias en la dosificación de agua del shotcrete y asegurar la consistencia adecuada de la mezcla.

Los resultados obtenidos, presentados en la Figura 17 evidencian variaciones en el contenido de humedad entre las mediciones realizadas en horario diurno y nocturno, lo cual fue considerado durante el proceso de ajuste de la relación agua/cemento.

Figura 18. Porcentaje de humedad de la arena de noche y día.

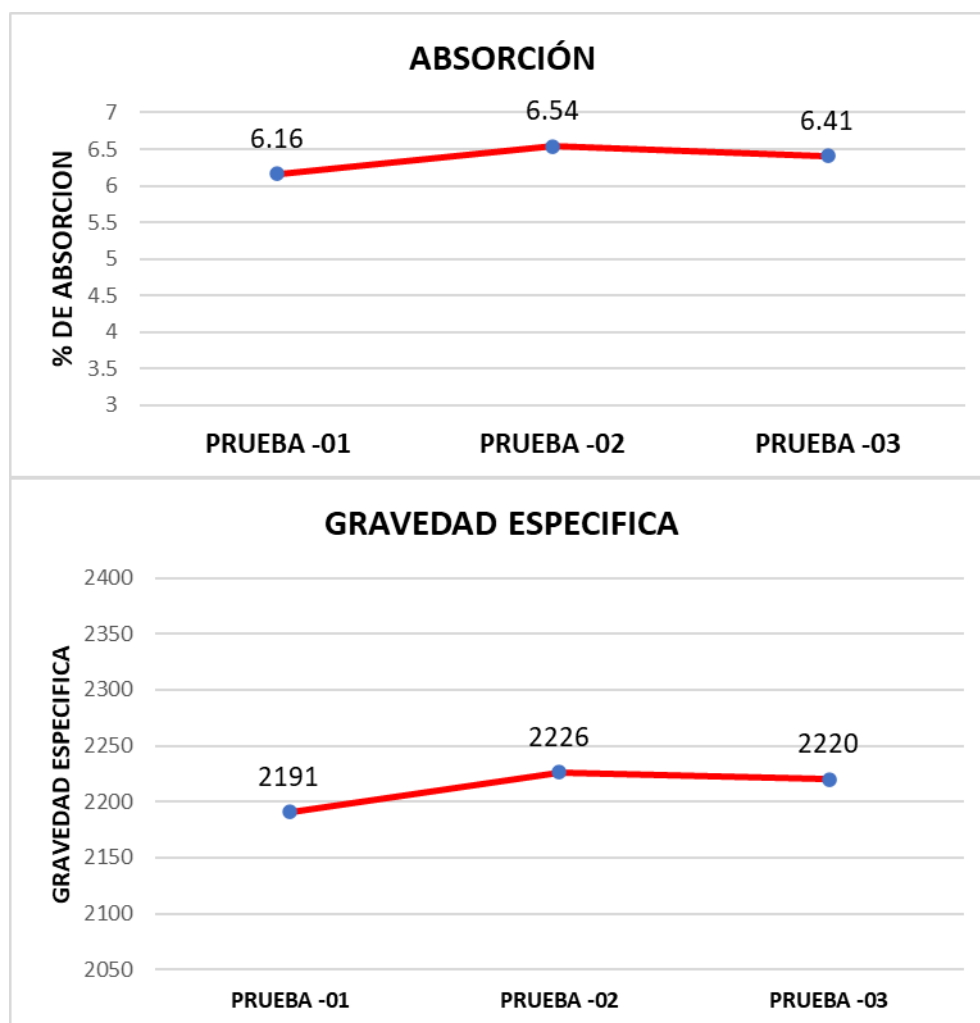


Nota: Elaboración propia.

Gravedad específica seca y absorción del agregado

La determinación de la gravedad específica seca y la absorción del agregado fino se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad del material para absorber agua y su influencia en la dosificación del concreto. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 18, observándose valores consistentes con los rangos esperados para arenas utilizadas en concreto proyectado.

Figura 19. Porcentaje de absorción y gravedad específica del agregado.



Nota: Elaboración Propia.

Peso Unitario, Slum, Rendimiento, Temperatura y Contenido de Aire del Shotcrete.

De acuerdo con la norma ASTM C-138, el peso unitario y el rendimiento del shotcrete se determinaron mediante el método gravimétrico, con la finalidad de verificar la uniformidad del diseño de mezcla, el correcto control volumétrico y la estabilidad del material en estado fresco. El rendimiento del shotcrete se mantuvo dentro del rango aceptable de 1.00 ± 0.02 , lo cual evidencia un adecuado balance entre los materiales constituyentes y un control eficiente durante el proceso de dosificación y producción tanto en planta como en mina.

El asentamiento (slump) del shotcrete evaluado presentó un valor promedio de $10 \frac{3}{4}$ " $\pm \frac{1}{4}$ " en planta y $10" \pm \frac{1}{4}"$ en mina, manteniéndose constante en los tres ensayos realizados. Este comportamiento refleja una trabajabilidad adecuada para el proceso de bombeo y

proyección, permitiendo una correcta aplicación del shotcrete sin segregación ni exudación excesiva, condiciones indispensables para lograr una buena adherencia al sustrato y un adecuado desempeño mecánico posterior.

El peso unitario del shotcrete en estado fresco mostró valores comprendidos entre 2007 y 2012 kg/m³, con variaciones mínimas entre las pruebas, lo que confirma la homogeneidad del material y la estabilidad del diseño de mezcla durante su producción. Estos valores son consistentes con un shotcrete de buena compactación y adecuada relación entre agregado, cemento y aditivos.

En cuanto al contenido de aire, los resultados oscilaron entre 7.0 % y 8.0 %, encontrándose dentro de rangos aceptables para shotcrete proyectado, contribuyendo positivamente a la trabajabilidad, reducción del rebote y mejora del comportamiento del material durante la proyección, sin afectar de manera significativa la resistencia temprana requerida para el sostenimiento.

La temperatura del concreto fresco se mantuvo entre 14.1 °C y 15.2 °C, valores adecuados para el proceso de hidratación del cemento y el desempeño del aditivo acelerante MR-193, favoreciendo el desarrollo de resistencias iniciales sin riesgos de fraguado prematuro ni retardos indeseados.

Tabla 8. Características físicas del shotcrete en estado fresco.

Ensayo	Slump (pulgadas)	Rendimiento	Peso Unitario (kg/m ³)	Contenido de % de aire	Temperatura concreto C°
Prueba-01	10 ¾	1.0	2012	8.0	15.2
Prueba-02	10 ¾	1.0	2008	7.0	15.2
Prueba-03	10 ¾	1.01	2007	8.0	14.1

Nota: Elaboración propia.

3.8.2. Evaluación de costos de sostenimiento del shotcrete con MR-193

En este ítem se analiza el comportamiento económico del shotcrete mediante la comparación entre dos aditivos acelerantes de fraguado: MR-160, caracterizado por un menor costo unitario de producción, y MR-193, cuyo costo por metro cúbico es mayor debido a su formulación orientada a maximizar la resistencia temprana. El análisis se desarrolla bajo un enfoque de costo total del sistema de sostenimiento, considerando no solo el costo directo del shotcrete, sino también los efectos que el incremento de resistencia temprana genera sobre el sostenimiento secundario, los tiempos de reingreso, la continuidad del ciclo de minado y el uso de equipos y mano de obra. De esta manera, se evalúa si el mayor costo directo asociado al MR-193 puede ser compensado por los beneficios operativos y económicos que aporta al proceso minero.

A. Comparación de costos unitarios de shotcrete según tipo de aditivo

El primer paso del análisis consiste en comparar los costos unitarios de producción del shotcrete utilizando los aditivos MR-160 y MR-193. Esta comparación permite identificar claramente la diferencia económica directa entre ambos aditivos y cuantificar el sobre costo inicial asociado al uso del MR-193, el cual será posteriormente contrastado con los beneficios operativos derivados de su mejor desempeño en resistencia temprana.

Tabla 9. Costo unitario de shotcrete con aditivo MR-160 y MR-193 (US\$/m³).

Escenario de producción (m ³ /mes)	Volumen medio (m ³)	Shotcrete con MR-160 (US\$/m ³)	Shotcrete con MR-193 (US\$/m ³)	Sobrecosto MR-193 (US\$/m ³)
4 801 – 5 200	5 000.50	170	182.23	12.23
5 201 – 5 600	5 400.50	170	166.33	-3.67
5 601 – 6 000	5 800.50	170	168.1	-1.90
6 001 – 6 400	6 200.50	170	177.23	7.23
6 401 – 6 800	6 600.50	170	180.76	10.76
6 801 – 7 200	7 000.50	170	185.66	15.66
7 201 – 7 600	7 400.50	170	180.06	10.06
PROMEDIO	6 200.50	170	177.2	7.2

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 9 evidencia que el shotcrete elaborado con el aditivo MR-160 presenta un menor costo unitario promedio en todos los escenarios evaluados, consolidándose como la alternativa económicamente más accesible desde el punto de vista del costo directo. En contraste, el shotcrete con MR-193 muestra un sobre costo promedio de 7.20 US\$/m³, con variaciones según el rango de producción mensual. Este incremento de costo directo constituye la base del análisis económico posterior, ya que representa el valor que debe ser compensado mediante los beneficios operativos derivados del mejor desempeño mecánico del MR-193.

B. Estructura de costos del shotcrete con aditivo MR-193

Una vez identificado el sobre costo del MR-193, es necesario analizar cómo se distribuye el costo total del shotcrete cuando se emplea este aditivo. La descomposición porcentual del costo permite determinar si el incremento está asociado al material en sí o a ineficiencias en las etapas de transporte y lanzado.

Tabla 10. Participación porcentual de los componentes del costo del shotcrete con MR-193.

Escenario	Dosificación + aditivo (%)	Transporte (%)	Lanzado (%)	Total (%)
4 801 – 5 200	51.74	21.28	26.98	100
5 201 – 5 600	54.21	19.45	26.34	100
5 601 – 6 000	53.18	19.55	27.27	100
6 001 – 6 400	51.82	21.45	26.73	100
6 401 – 6 800	50.32	23.14	26.54	100
6 801 – 7 200	49.13	23.2	27.67	100
7 201 – 7 600	49.85	22.74	27.41	100
PROMEDIO	51.46	21.83	26.71	100

Nota: Elaboración Propia.

La estructura porcentual del costo del shotcrete con MR-193 indica que más del 50 % del costo total corresponde a la dosificación y al aditivo, lo cual confirma que el incremento del costo unitario se origina principalmente en el componente de material. El transporte y el lanzado mantienen participaciones relativamente estables, lo que evidencia que el uso del MR-193 no genera sobre costos por ineficiencias operativas, sino por una decisión técnica orientada a mejorar la resistencia temprana y el desempeño del sostenimiento.

C. Sobre costo por metro de avance respecto al diseño patrón MR-160

Para evaluar el impacto económico real del uso del MR-193 en el desarrollo minero, el análisis debe expresarse en términos de costo por metro de avance, ya que esta variable

integra el consumo de shotcrete con la geometría de la labor y permite comparar directamente el costo del sostenimiento con el avance efectivo.

Tabla 11. Comparación del costo por metro de avance: MR-160 vs MR-193. (Sección típica 4.0×4.0 m; consumo de shotcrete = $1.12 \text{ m}^3/\text{m}$).

Escenario	MR-160 (US\$/m)	MR-193 (US\$/m)	Sobre costo MR-193 (US\$/m)
4 801 – 5 200	190.4	204.1	13.7
5 201 – 5 600	190.4	186.29	-4.11
5 601 – 6 000	190.4	188.27	-2.13
6 001 – 6 400	190.4	198.5	8.1
6 401 – 6 800	190.4	202.45	12.05
6 801 – 7 200	190.4	207.94	17.54
7 201 – 7 600	190.4	201.67	11.27
PROMEDIO	190.4	198.46	8.06

Nota: elaboración Propia.

La Tabla 11 muestra que el uso del aditivo MR-193 genera un sobre costo promedio de 8.06 US\$/m de avance respecto al diseño patrón con MR-160. Este valor representa el umbral económico que debe ser compensado mediante mejoras operativas para justificar su implementación. La tabla permite identificar los escenarios más exigentes desde el punto de vista económico y establece una referencia clara para evaluar los beneficios asociados a la reducción de sostenimiento secundario y a los reingresos más rápidos.

D. Beneficios operativos asociados al uso del aditivo MR-193

El incremento de la resistencia temprana del shotcrete obtenido mediante el uso del aditivo MR-193 genera impactos directos en el sistema de sostenimiento. Estos impactos se manifiestan principalmente en la reducción del sostenimiento secundario, al disminuir o eliminar la necesidad de pernos adicionales, malla electrosoldada y elementos estructurales especiales. Asimismo, esta mejora permite reducir la exposición del personal y las interferencias con el ciclo de minado, contribuyendo a una operación más segura y eficiente.

Tabla 12. Reducción de sostenimiento secundario por metro de avance asociada al uso del MR-193.

Tipo de sostenimiento	Diseño patrón (MR-160)	Diseño con MR-193	Reducción lograda	Costo unitario (US\$)	Ahorro estimado (US\$/m)
Pernos Omegabolt 7 ft (und/m)	0.4	0	0.4	23.03	9.21
Malla electrosoldada (m ² /m)	2	0	2	9.43	18.86
Cimbras y refuerzos especiales	Presente	Reducido	—	—	8.1
Total ahorro en sostenimiento	—	—	—	—	36.17

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 12 demuestra que el uso del aditivo MR-193 permite reducir significativamente el sostenimiento secundario requerido por metro de avance. La eliminación o disminución de pernos Omegabolt y malla electrosoldada, así como la menor necesidad de cimbras y refuerzos especiales, genera un ahorro directo estimado en **36.17 US\$/m**. Este ahorro no solo impacta positivamente en los costos de materiales, sino también en la reducción de mano de obra, equipos auxiliares y tiempos de intervención en el frente, reforzando la eficiencia operativa del sistema de sostenimiento.

E. Beneficios operativos asociados al uso del aditivo MR-193

Una vez cuantificados el sobre costo del shotcrete con MR-193 y los ahorros derivados de la reducción del sostenimiento secundario, es necesario integrar estos resultados en un balance económico global. Adicionalmente, se incorpora el efecto del reingreso más rápido al frente de trabajo, el cual reduce tiempos improductivos, optimiza el ciclo de minado y disminuye el uso de equipos y mano de obra asociados a sostenimiento y control del frente.

Tabla 13. Balance económico neto por metro de avance asociado al uso del MR-193.

Escenario	Sobrecosto MR-193 (US\$/m)	Ahorro en sostenimiento (US\$/m)	Ahorro por reingreso rápido (US\$/m)	Beneficio total (US\$/m)	Resultado neto (US\$/m)
4 801 – 5 200	13.7	36.17	20.4	56.57	–42.87
6 001 – 6 400	8.1	36.17	20.4	56.57	–48.47
6 401 – 6 800	12.05	36.17	20.4	56.57	–44.52
6 801 – 7 200	17.54	36.17	20.4	56.57	–39.03
PROMEDIO	8.06	36.17	20.4	56.57	–48.51

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 13 presenta el balance económico integral del uso del aditivo MR-193, evidenciando que, pese al sobre costo inicial del shotcrete, los ahorros generados por la reducción de sostenimiento

secundario y el reingreso más rápido superan ampliamente dicho incremento. El resultado neto promedio de **-48.51 US\$/m** confirma que el MR-193 no solo es técnicamente superior, sino también económicamente conveniente cuando se evalúa el sistema de sostenimiento de manera integral. Incluso en los escenarios más exigentes, el balance se mantiene favorable, validando la viabilidad económica de su implementación.

3.8.3. Procedimiento para la determinación del incremento de resistencia temprana

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del shotcrete a edades tempranas empleando el aditivo acelerante MR-193, se realizaron ensayos de resistencia inicial directamente en paneles de concreto proyectado. El lanzamiento del shotcrete fue ejecutado por el operador del robot lanzador, garantizando condiciones representativas de campo y alineadas al proceso operativo real de la unidad minera.

Las evaluaciones de resistencia temprana se efectuaron mediante dos métodos de ensayo ampliamente utilizados en minería subterránea: el método de ensayo A, empleando el penetrómetro Proctor, y el método de ensayo B, utilizando la pistola Hilti. Ambos métodos permitieron determinar la evolución de la resistencia del shotcrete en función del tiempo, expresando los resultados en megapascuales (MPa) para facilitar su comparación y análisis.

Prueba 1

Método de ensayo A: Penetrómetro Proctor

Para este método se utilizó la curva de calibración tipo II, considerando un agregado con diámetro máximo comprendido entre 0 y 16 mm. El ensayo se realizó directamente sobre los paneles de shotcrete recién proyectados, permitiendo medir la resistencia a la penetración en distintos intervalos de tiempo.

Tabla 14. Pruebas realizadas con el Penetrómetro Proctor.

Hora de lectura (hh:mm)	Hora acumulada (hh:mm)	Temperatura ambiente (°C)	Fuerza a la penetración (kp)					Promedio (kp)	Resistencia (N/mm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
10:15	00:15	16.5	22	27	27	22	27	25	0.45	4.57
10:30	00:30	16.5	32	32	32	32	32	30.5	0.55	5.57
10:45	00:45	16.5	37	42	42	47	42	41.5	0.74	7.58
11:00	01:00	16.5	47	52	57	57	52	52.5	0.94	9.59
11:15	01:15	16.5	57	57	62	62	62	60.5	1.08	11.05

Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante el penetrómetro Proctor evidencian un incremento progresivo y acelerado de la resistencia del shotcrete en las primeras horas posteriores al lanzado. Se observa que a partir de las 3.2 horas el material alcanza resistencias superiores a 3 MPa, lo que indica una rápida ganancia de resistencia inicial atribuible al uso del aditivo MR-193. Este comportamiento resulta favorable para reducir los tiempos de espera antes del reingreso al frente de trabajo.

Método de ensayo B: Pistola Hilti

Tabla 15. Ensayo realizado en el panel con pistola Hilty.

Hora de ensayo (hh:mm)	Tiempo transcurrido (hh:mm)	T. ambiente (°C)	Longitud total del perno (mm)	Saliente del perno (mm)	Penetración del perno (mm)	Carga a la transmisión (kN)	N/m	Prom. (N/mm)	Resist. (MPa)
13:20	03:20	16.7	103	20	83	2000	24	22.67	3.3
				20	83	2000	24		
				20	83	1800	22		
				17	86	2000	23		
				19	84	1700	20		
				15	65	2100	32		
13:40	03:40	16.8	80	14	66	2000	30	30.67	4.34
				16	64	1900	30		
				15	65	2000	31		
				14	66	2000	30		

Nota: Elaboración Propia.

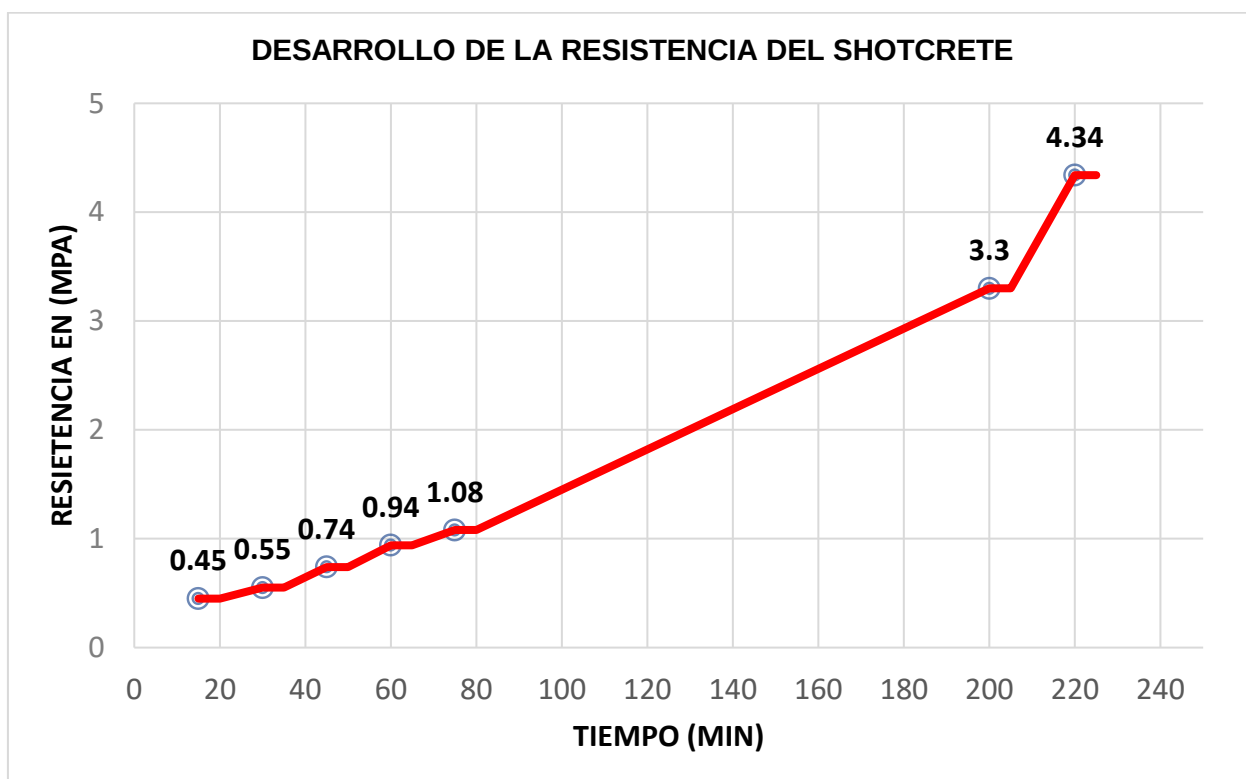
Los resultados obtenidos mediante el método de ensayo B, utilizando la pistola Hilti, evidencian un comportamiento favorable del shotcrete a edades tempranas cuando se emplea el aditivo acelerante MR-193. A las 3 horas con 20 minutos de tiempo transcurrido, se registraron valores de resistencia promedio de 3.30 MPa, correspondientes a una clasificación J2, lo que indica que el material alcanza una resistencia adecuada para permitir labores posteriores como perforación y voladura en condiciones operativas exigentes. Posteriormente, a las 3 horas con 40 minutos, la resistencia temprana se incrementó hasta 4.34 MPa, clasificándose como J3, apta para condiciones de mayor exigencia, incluyendo fuerte afluencia de agua y sostenimiento inmediato. Este incremento de resistencia se asocia

directamente con la reducción de la penetración del perno y el aumento de los valores de N/mm, lo cual refleja un rápido endurecimiento del material. Asimismo, la consistencia de los resultados obtenidos demuestra una correcta dosificación del aditivo y una aplicación homogénea del shotcrete, confirmando que el uso del MR-193 contribuye a reducir el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo sin comprometer la seguridad ni la calidad del sostenimiento.

Cuadro estadístico entre el método de ensayo A y B

En este cuadro se presenta de manera comparativa la evolución de la resistencia temprana del shotcrete, determinada mediante los métodos de ensayo A (penetrómetro Proctor) y B (pistola Hilti). Los resultados obtenidos con ambos métodos fueron convertidos y expresados en megapascuales (MPa), lo que permite una comparación directa y homogénea de los valores de resistencia y facilita su posterior representación gráfica para el análisis del desarrollo de la resistencia en función del tiempo.

Figura 20. Desarrollo de resistencia del shotcrete.



Nota: Elaboración propia.

La Figura 20 muestra la evolución de la resistencia temprana del shotcrete en función del tiempo, obtenida a partir de los resultados de los métodos de ensayo A (penetrómetro Proctor) y B (pistola Hilti), expresados de manera unificada en megapascuales (MPa). Se observa un incremento progresivo y continuo de la resistencia desde los primeros minutos posteriores al lanzado, iniciando con valores cercanos a 0.45 MPa a los 15 minutos y alcanzando aproximadamente 1.08 MPa alrededor de los 75 minutos, lo que evidencia un adecuado inicio del proceso de fraguado. Posteriormente, la pendiente de la curva se incrementa de manera significativa, registrándose resistencias de 3.30 MPa a los 200 minutos y 4.34 MPa a los 220 minutos, lo cual refleja una acelerada ganancia de resistencia atribuible al uso del aditivo MR-193. La tendencia ascendente y continua de la curva confirma la coherencia entre ambos métodos de ensayo y demuestra que el shotcrete alcanza resistencias tempranas suficientes para permitir el reingreso seguro y oportuno al frente de trabajo, optimizando la continuidad del ciclo de minado.

Prueba 2

Método de ensayo A: Penetrómetro Proctor

Con el fin de evaluar el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete a edades iniciales, se realizaron ensayos en paneles de concreto proyectado empleando el penetrómetro Proctor, método que permite determinar la resistencia inicial a partir de la fuerza necesaria para la penetración en el material. Las mediciones se efectuaron a distintos intervalos de tiempo posteriores al lanzado, manteniendo constante la temperatura ambiente, con el objetivo de analizar la evolución progresiva de la resistencia y verificar el desempeño del aditivo acelerante MR-193 en condiciones reales de campo.

Tabla 16. Pruebas realizadas en el panel con el penetrómetro Proctor.

Hora de lectura (hh:mm)	Hora acumulada (hh:mm)	Temperatura ambiente (°C)	Fuerza a la penetración (kp)					Promedio (kp)	Resistencia (N/mm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
12:35	00:15	16.5	22	27	27	22	27	25	0.45	4.57
12:50	00:30	16.5	32	32	27	32	32	30.5	0.55	5.57
13:05	00:45	16.5	37	42	42	47	42	41.5	0.74	7.58
13:20	01:00	16.5	47	52	57	52	57	52.5	0.94	9.59
13:35	01:15	16.5	57	57	62	62	62	60.5	1.08	11.05

Nota: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos mediante el penetrómetro Proctor muestran un incremento progresivo de la resistencia temprana del shotcrete conforme avanza el tiempo de fraguado. A

los 15 minutos se registra una resistencia inicial de 0.45 N/mm², evidenciando un inicio eficiente del endurecimiento, mientras que a los 75 minutos la resistencia alcanza 1.08 N/mm², lo que confirma una rápida ganancia de resistencia inicial. Este comportamiento demuestra la efectividad del aditivo MR-193 en la aceleración del fraguado, permitiendo reducir los tiempos de espera y favoreciendo el reingreso oportuno al frente de trabajo sin comprometer la seguridad.

Método de ensayo B: Pistola Hilty

Tabla 17. Pruebas realizadas en el panel haciendo uso de la pistola Hilty.

Hora de ensayo (hh:mm)	Tiempo transcurrido (hh:mm)	Temp. ambiente (°C)	Longitud total del perno (mm)	Saliente del perno (mm)	Penetración del perno (mm)	Lectura de carga a la transmisión (kN)	N/mm	Prom. (N/mm)	Resistencia (MPa)
14:20	02:00	16.7	103	15	88	1400	16	17.42	2.62
				17	86	1600	19		
				20	83	1400	17		
				18	85	1500	18		
				20	83	1500	18		
16:20	04:00	16.8	80	13	67	2000	30	30.39	4.3
				15	65	1900	29		
				17	63	2100	33		
				16	64	1900	30		
				13	67	2000	30		

Nota: Elaboración propia.

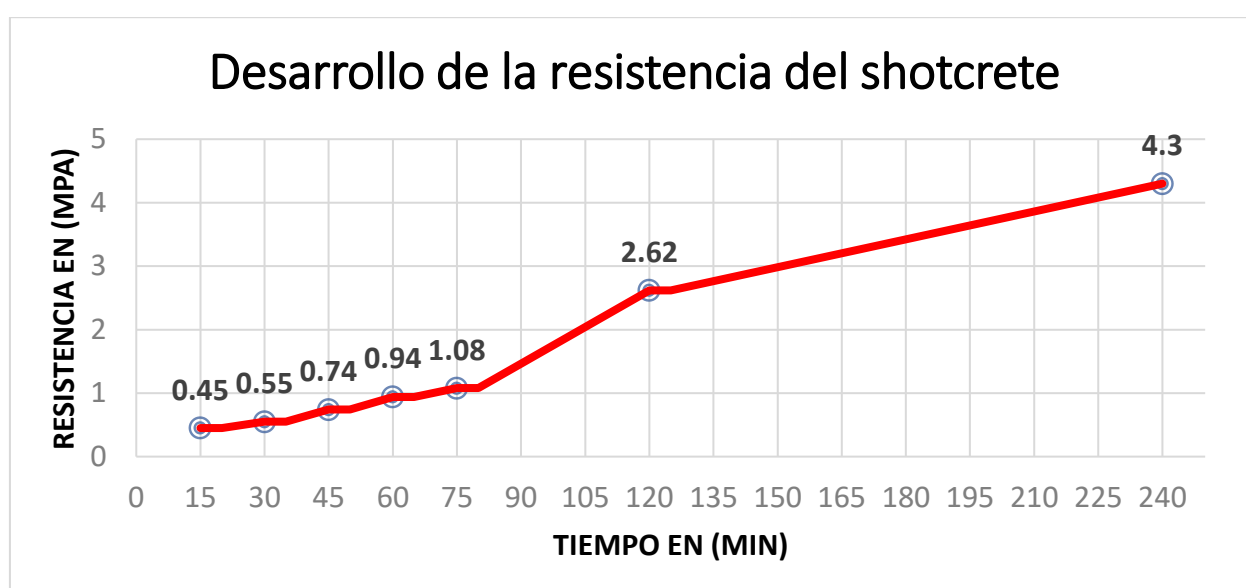
Los resultados obtenidos mediante el ensayo con pistola Hilty muestran una evolución favorable de la resistencia temprana del shotcrete con el transcurso del tiempo. A las 2 horas, el material alcanza una resistencia promedio de 2.62 MPa, correspondiente a una condición operativamente aceptable para actividades iniciales en el frente de trabajo. Posteriormente, a las 4 horas, la resistencia se incrementa hasta 4.30 MPa, evidenciando una ganancia significativa de resistencia y una reducción de la penetración del perno. Este comportamiento confirma la efectividad del aditivo acelerante MR-193 en el desarrollo rápido de resistencia inicial, permitiendo un reingreso seguro y oportuno al frente de trabajo.

Cuadro estadístico entre el método A y B.

El cuadro estadístico comparativo entre el método de ensayo A (penetrómetro Proctor) y el método de ensayo B (pistola Hilty) evidencia una adecuada correspondencia entre ambos procedimientos en la evaluación de la resistencia temprana del shotcrete. En las primeras etapas, el método Proctor permite identificar el inicio del desarrollo de la resistencia, registrando valores entre 0.45 y 1.08 MPa durante los primeros 75 minutos. Posteriormente,

el método Hilti complementa la evaluación a mayores tiempos de fraguado, registrando resistencias de 2.62 MPa a las 2 horas y 4.30 MPa a las 4 horas. La conversión de los resultados a una misma unidad (MPa) permite una comparación directa, mostrando una tendencia coherente y progresiva entre ambos métodos. Esta complementariedad valida la confiabilidad de los ensayos realizados y confirma que el uso conjunto de ambos métodos proporciona una evaluación integral del comportamiento mecánico del shotcrete a edades tempranas, respaldando la determinación del tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo.

Figura 21. Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete a las 2 y 4 horas.



Nota: Elaboración propia.

La Figura 21 muestra la evolución de la resistencia temprana del shotcrete en función del tiempo, integrando los resultados obtenidos mediante los métodos de ensayo A (penetrómetro Proctor) y B (pistola Hilti), expresados de manera uniforme en megapascuales (MPa). Se observa que, durante los primeros 75 minutos posteriores al lanzado, la resistencia aumenta gradualmente desde 0.45 MPa hasta 1.08 MPa, lo que evidencia un inicio eficiente del proceso de fraguado. A partir de los 120 minutos, la curva presenta un incremento más pronunciado, alcanzando una resistencia de 2.62 MPa, y posteriormente continúa su desarrollo hasta llegar a 4.30 MPa a los 240 minutos. Este comportamiento indica una acelerada ganancia de resistencia inicial atribuible al uso del aditivo MR-193. La tendencia ascendente y continua de la curva confirma la coherencia de los resultados obtenidos con ambos métodos de ensayo y demuestra que el shotcrete alcanza resistencias suficientes para permitir el reingreso seguro y oportuno al frente de trabajo, optimizando la continuidad del ciclo de minado.

Prueba 3

Método de ensayo A: Penetrómetro Proctor

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del shotcrete a edades tempranas en una tercera prueba experimental, se realizaron ensayos de resistencia inicial en paneles de concreto proyectado empleando el penetrómetro Proctor. Las mediciones se efectuaron a intervalos regulares de tiempo posteriores al lanzado, manteniendo condiciones ambientales controladas, con el fin de analizar la evolución progresiva de la resistencia temprana y verificar la consistencia del desempeño del aditivo acelerante MR-193 en distintas pruebas de campo.

Tabla 18. Pruebas realizadas en el panel con el penetrómetro Proctor.

Hora de lectura (hh:mm)	Hora acumulada (hh:mm)	Temperatura ambiente (°C)	Fuerza a la penetración (kp)					Promedio (kp)	Resistencia (N/mm ²)	Resistencia (kg/cm ²)
11:15	00:15	16.5	22	27	22	22	27	24	0.43	4.38
11:30	00:30	16.5	32	32	22	32	32	31	0.56	5.66
11:45	00:45	16.5	37	42	42	42	42	41	0.73	7.49
12:00	01:00	16.5	47	52	57	52	57	52	0.93	9.5
12:15	01:15	16.6	57	57	62	62	62	60	1.07	10.96

Nota: Elaboración Propia.

Los resultados de la Prueba 3 evidencian un incremento progresivo y sostenido de la resistencia temprana del shotcrete conforme avanza el tiempo de fraguado. A los 15 minutos se registra una resistencia inicial de 0.43 N/mm², mientras que a los 75 minutos la resistencia alcanza 1.07 N/mm², lo que demuestra una rápida ganancia de resistencia en las primeras etapas. Este comportamiento confirma la efectividad y consistencia del aditivo acelerante MR-193, así como la adecuada homogeneidad de la mezcla y correcta aplicación del shotcrete, permitiendo reducir los tiempos de espera y favoreciendo un reingreso oportuno y seguro al frente de trabajo.

Método de ensayo B: Pistola Hilty

Tabla 19. Pruebas realizadas en el panel con la pistola Hilty.

Hora de ensayo (hh:mm)	Tiempo transcurrido (hh:mm)	Temp. ambiente (°C)	Longitud total del perno (mm)	Saliente del perno (mm)	Penetración del perno (mm)	Lectura de carga a la transmisión (kN)	N/mm	Prom. (N/mm)	Resist. (MPa)
13:30	02:30	18.2	103	12	91	1700	19	17.5	2.57
				16	87	1600	18		
				14	89	1400	16		
				11	92	1500	16		
				10	93	1500	16		
				18	62	2100	34		
15:30	04:30	16.8	80	20	60	2300	38	36.11	5.04
				22	58	2100	36		
				18	62	2200	35		
				20	60	2200	37		

Nota: Elaboración propia

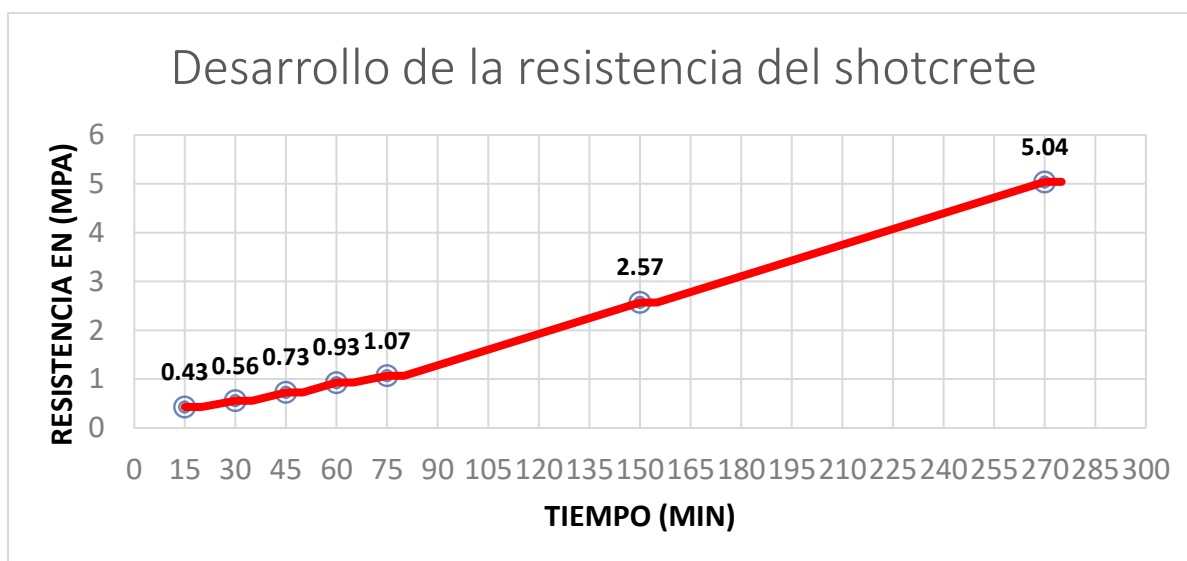
Los resultados obtenidos mediante el método de ensayo B muestran una ganancia progresiva de la resistencia temprana del shotcrete conforme aumenta el tiempo de fraguado. A las 2 horas con 30 minutos, el material alcanza una resistencia promedio de 2.57 MPa, lo que indica un adecuado desarrollo inicial del endurecimiento. Posteriormente, a las 4 horas con 30 minutos, la resistencia se incrementa hasta 5.04 MPa, evidenciando una reducción significativa de la penetración del perno y un aumento de los valores de N/mm. La comparación con el método A permite observar una continuidad coherente en el desarrollo de la resistencia, validando la complementariedad de ambos métodos de ensayo y confirmando la efectividad del aditivo acelerante MR-193 para lograr un reingreso seguro y oportuno al frente de trabajo.

Cuadro estadístico entre el método A y B

El cuadro estadístico comparativo entre el método de ensayo A (penetrómetro Proctor) y el método de ensayo B (pistola Hilti) permite analizar de manera integral la evolución de la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193. El método A se empleó principalmente durante las primeras etapas del fraguado, proporcionando mediciones confiables de resistencia inicial desde los 15 hasta los 75 minutos, rango en el cual se observa un incremento gradual de la resistencia desde valores cercanos a 0.45 MPa hasta aproximadamente 1.08 MPa. Por su parte, el método B permitió evaluar resistencias a edades más avanzadas, a partir de las 2.5 horas, registrando valores significativamente mayores que

alcanzan resistencias del orden de 2.57 MPa, 3.30 MPa y hasta 5.04 MPa a las 4.5 horas. La comparación de ambos métodos evidencia una continuidad coherente en el desarrollo de la resistencia, sin saltos abruptos ni inconsistencias, lo que valida la confiabilidad de los ensayos y confirma que el shotcrete tratado con MR-193 cumple con los requisitos de resistencia temprana necesarios para garantizar un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo.

Figura 22. Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete a las 2.5 horas y 4.5 horas.



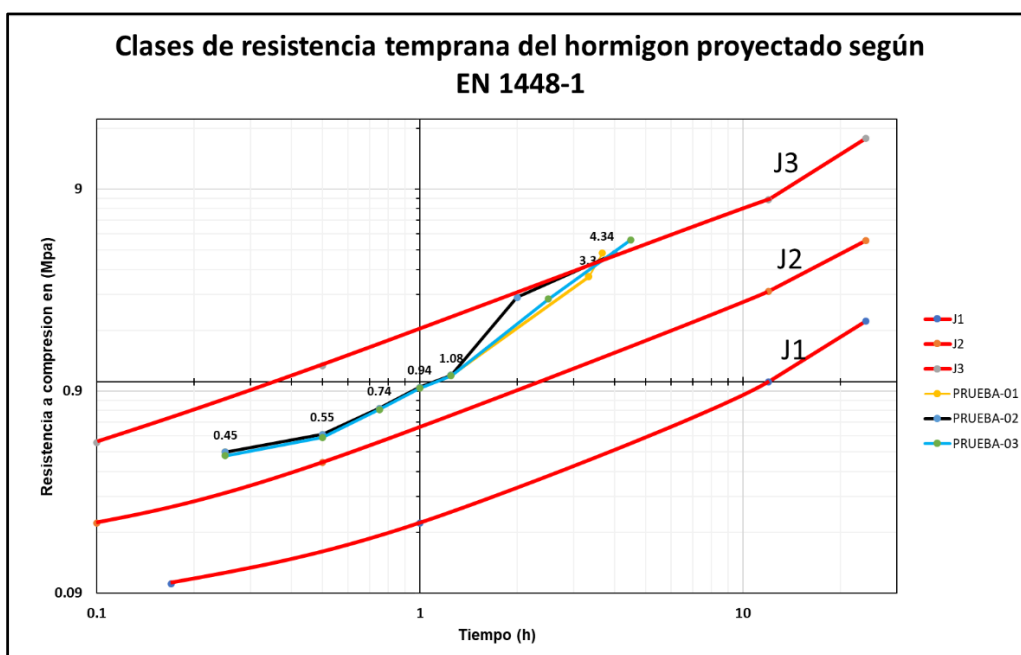
Nota: Elaboración propia.

La Figura 22 muestra la evolución de la resistencia temprana del shotcrete en función del tiempo, evidenciando un incremento progresivo y continuo desde los primeros minutos posteriores al lanzado hasta las 4.5 horas de curado. En las etapas iniciales, entre los 15 y 75 minutos, la resistencia aumenta gradualmente desde valores de 0.43 MPa hasta aproximadamente 1.07 MPa, comportamiento característico de un fraguado acelerado y estable. Posteriormente, a las 2.5 horas, se observa un incremento significativo de la resistencia hasta 2.57 MPa, lo que indica una consolidación efectiva de la matriz del concreto proyectado. Finalmente, a las 4.5 horas, la resistencia alcanza un valor de 5.04 MPa, confirmando que el shotcrete con aditivo MR-193 desarrolla resistencias tempranas suficientes para condiciones operativas exigentes. Esta tendencia valida la clasificación del shotcrete dentro de las clases J2 y J3, permitiendo un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo y garantizando la continuidad del ciclo de minado.

Curvas J del shotcrete en las tres pruebas realizadas

Las clases de resistencia J1, J2 y J3 representan categorías para clasificar la resistencia del hormigón proyectado, la forma de estas curvas se puede apreciar en la siguiente figura y dentro de ellas las tres pruebas realizadas.

Figura 23. Clases de resistencia temprana alcanzada del hormigón proyectado en las tres pruebas.



Nota: Elaboración propia.

En esta grafica se puede observar que las tres pruebas realizadas de resistencia inicial califican como clase J2, lo cual es apto para circunstancias difíciles, como por ejemplo en caso de afluencia leve de agua y paso inmediatos posteriores tales como perforación y voladura. En cuanto a la evaluación de la resistencia temprana alcanza a clase J3 a los 3.70 horas aproximadamente lo cual este tipo se usa en fuerte afluencia de agua y casos especiales los cuales son adecuados a la realidad geológica de la U.M. Inmaculada.

Resultados de resistencia a la compresión de testigos 4'' x 8'' de concreto.

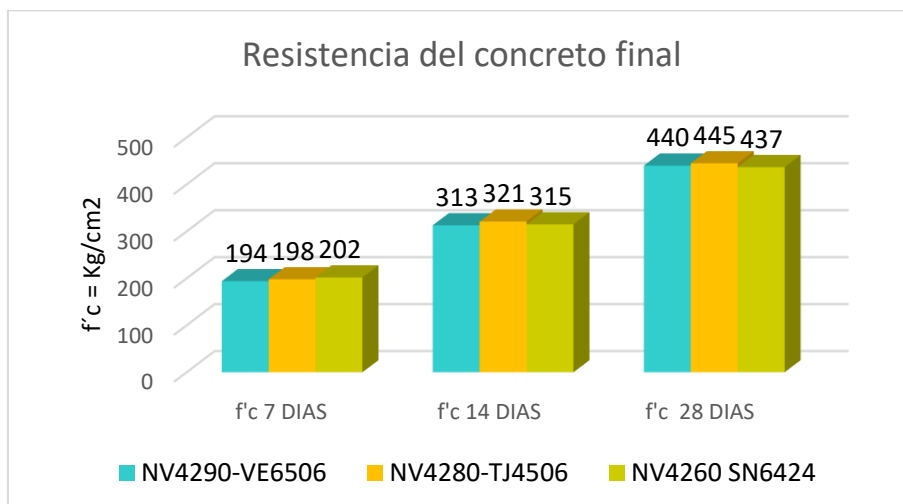
Con la finalidad de verificar el desempeño mecánico final del concreto proyectado empleado en las tres pruebas experimentales, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en testigos cilíndricos de 4'' x 8'', conforme a los procedimientos establecidos por la unidad minera. Estos ensayos permiten evaluar si el diseño de mezcla del shotcrete, acelerado con el aditivo MR-193, cumple con los estándares mínimos de resistencia especificados y garantiza un adecuado comportamiento estructural a edades de 7, 14 y 28 días.

Tabla 20. Ensayo de resistencias finales realizada a las tres pruebas.

Ítem	Fecha de muestreo	Fecha de rotura 7 días	Fecha de rotura 14 días	Fecha de rotura 28 días	Ubicación	Resistencia especificada (kg/cm ²)	f'c 7 días (kg/cm ²)	f'c 14 días (kg/cm ²)	f'c 28 días (kg/cm ²)
1	29/06/2024	6/07/2024	13/07/2024	27/07/2024	NV4290–VE6506	280	194	313	440
2	30/06/2024	7/07/2024	14/07/2024	28/07/2024	NV4280–TJ4506	280	198	321	445
3	1/07/2024	8/07/2024	15/07/2024	29/07/2024	NV4260–SN6424	280	202	315	437

Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión muestran que las tres pruebas superan ampliamente la resistencia especificada de diseño de 280 kg/cm² a los 28 días, alcanzando valores finales de 437, 440 y 445 kg/cm². Asimismo, se observa un adecuado desarrollo de resistencia a edades tempranas, con valores crecientes a los 7 y 14 días, lo que evidencia un comportamiento mecánico favorable del concreto proyectado. Estos resultados confirman que el uso del aditivo MR-193 no solo mejora la resistencia temprana del shotcrete, sino que también garantiza un excelente desempeño estructural a largo plazo, cumpliendo con los estándares técnicos exigidos por la unidad minera.

Figura 23. Resistencias finales del concreto proyectado.

Nota: Elaboración propia.

La Figura 24 muestra la evolución de la resistencia a la compresión del concreto proyectado a las edades de 7, 14 y 28 días para las tres pruebas evaluadas. A los 7 días, las resistencias obtenidas varían entre 194 y 202 kg/cm², lo que representa aproximadamente entre el 69 % y 72 % de la resistencia especificada, evidenciando un adecuado desarrollo inicial del concreto. A los 14 días, las resistencias se incrementan de manera significativa, alcanzando valores entre 313 y 321 kg/cm², superando el valor mínimo especificado de $f'_c = 280$ kg/cm², lo que confirma un comportamiento favorable del diseño de mezcla en edades intermedias. Finalmente, a los 28 días, las resistencias finales alcanzan valores de 437, 440 y 445 kg/cm², superando ampliamente el estándar mínimo requerido por la unidad minera. Este comportamiento demuestra que el concreto proyectado con el aditivo MR-193 no solo garantiza una adecuada resistencia temprana, sino que también asegura un excelente desempeño mecánico a largo plazo, validando la idoneidad del diseño propuesto para aplicaciones de sostenimiento en minería subterránea.

3.8.4. Determinación del tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo

En esta etapa se analizó el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con aditivo MR-193 en función del tiempo de fraguado. Las mediciones se realizaron en tres frentes de trabajo, empleando dos métodos de evaluación no destructiva: el penetrómetro Proctor (Método A) y la pistola Hilti (Método B). La comparación de ambos métodos permitió validar la tendencia de ganancia de resistencia y contar con una base técnica para la determinación del tiempo óptimo de reingreso seguro.

Tabla 21. Desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 según método de ensayo.

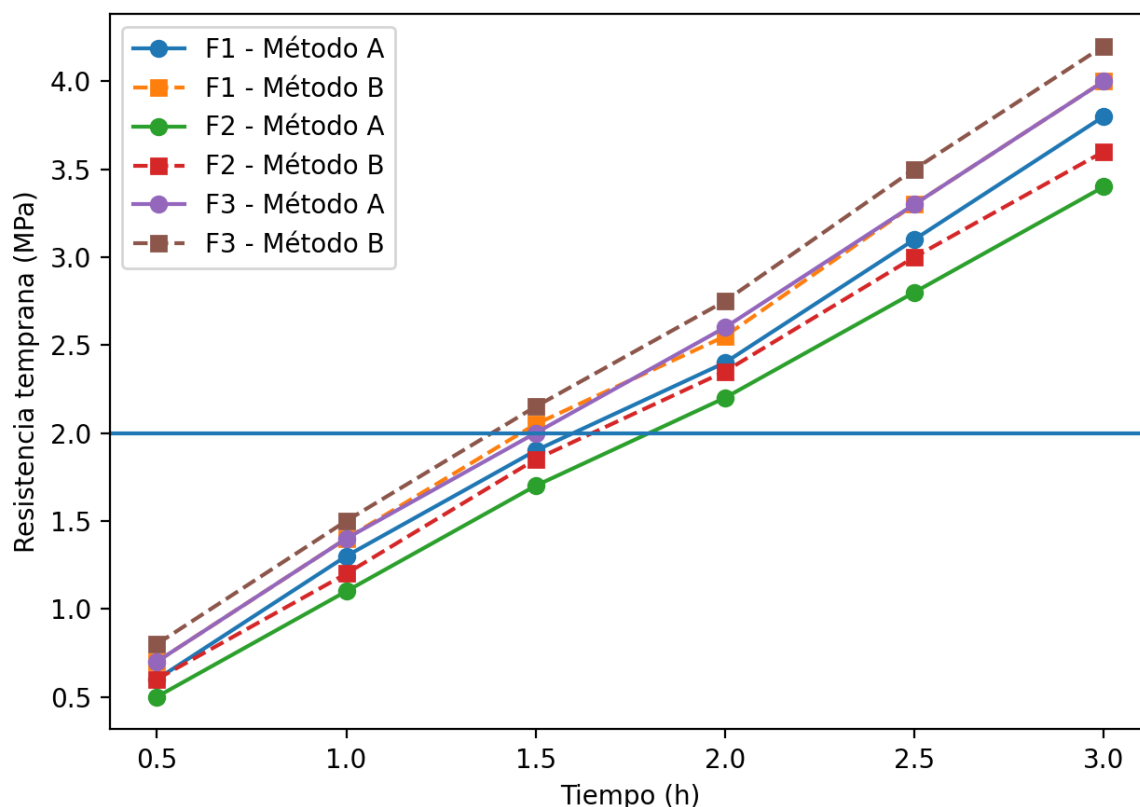
Frente	Tiempo (h)	Método A – Proctor (MPa)	Método B – Hilti (MPa)	Resistencia promedio (MPa)
Frente 1	0.5	0.6	0.7	0.65
Frente 1	1	1.3	1.4	1.35
Frente 1	1.5	1.9	2.05	1.98
Frente 1	2	2.4	2.55	2.47
Frente 1	2.5	3.1	3.3	3.2
Frente 1	3	3.8	4	3.9
Frente 2	0.5	0.5	0.6	0.55
Frente 2	1	1.1	1.2	1.15
Frente 2	1.5	1.7	1.85	1.78
Frente 2	2	2.2	2.35	2.28
Frente 2	2.5	2.8	3	2.9
Frente 2	3	3.4	3.6	3.5
Frente 3	0.5	0.7	0.8	0.75
Frente 3	1	1.4	1.5	1.45
Frente 3	1.5	2	2.15	2.08
Frente 3	2	2.6	2.75	2.68
Frente 3	2.5	3.3	3.5	3.4
Frente 3	3	4	4.2	4.1

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 21 muestra el desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con aditivo MR-193 en tres frentes de trabajo, medido mediante el Método A (penetrómetro Proctor) y el Método B (pistola Hilti). Se observa una tendencia consistente de incremento de resistencia con el tiempo en ambos métodos, siendo el Método B ligeramente superior. La resistencia promedio permite evaluar el comportamiento real del material y sirve como base para determinar el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo.

Con el propósito de visualizar el comportamiento del shotcrete a edades tempranas, se elaboraron curvas de resistencia en función del tiempo para cada frente de trabajo, considerando ambos métodos de evaluación. Estas curvas permiten identificar el momento en el cual la resistencia alcanza el umbral mínimo requerido para el reingreso seguro al frente de trabajo.

Figura 24. Curvas resistencia vs tiempo.



Nota: Elaboración propia.

3.8.5. Procedimiento para cálculo del tiempo óptimo de reingreso seguro mediante interpolación lineal

El tiempo óptimo de reingreso seguro (T_{opt}) se determinó mediante el método de interpolación lineal, considerando como criterio técnico una resistencia temprana mínima de 2.00 MPa. Dicho método permite estimar con precisión el instante en que el shotcrete alcanza el umbral de reingreso, cuando las mediciones de resistencia se realizan en intervalos de tiempo discretos.

Fórmula de interpolación lineal

$$T_{opt} = t_0 + [(f_{segura} - f_0) / (f_1 - f_0)] \times (t_1 - t_0)$$

donde:

$$t_0 = \text{tiempo inferior (h)}$$

$$t_1 = \text{tiempo superior (h)}$$

$$f_0 = \text{resistencia en } t_0 \text{ (MPa)}$$

$$f_1 = \text{resistencia en } t_1 \text{ (MPa)}$$

$$f_{segura} = \text{resistencia mínima para reingreso seguro (2.00 MPa)}$$

Cálculo para el Frente F1

Datos:

$$t_0 = 1.50 \text{ h}, f_0 = 1.98 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 2.00 \text{ h}, f_1 = 2.47 \text{ MPa}$$

Aplicando la fórmula:

$$T_{opt} = 1.50 + [(2.00 - 1.98) / (2.47 - 1.98)] \times (2.00 - 1.50)$$

$$T_{opt} = 1.50 + (0.02 / 0.49) \times 0.50$$

$$T_{opt} = 1.50 + 0.0204 = 1.52 \text{ h}$$

Cálculo para el Frente F2

Datos:

$$t_0 = 1.50 \text{ h}, f_0 = 1.78 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 2.00 \text{ h}, f_1 = 2.28 \text{ MPa}$$

Aplicando la fórmula:

$$T_{opt} = 1.50 + [(2.00 - 1.78) / (2.28 - 1.78)] \times (2.00 - 1.50)$$

$$T_{opt} = 1.50 + (0.22 / 0.50) \times 0.50$$

$$T_{opt} = 1.50 + 0.22 = 1.72 \text{ h}$$

Cálculo para el Frente F3

Datos:

$$t_0 = 1.00 \text{ h}, f_0 = 1.45 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 1.50 \text{ h}, f_1 = 2.08 \text{ MPa}$$

Aplicando la fórmula:

$$T_{opt} = 1.00 + [(2.00 - 1.45) / (2.08 - 1.45)] \times (1.50 - 1.00)$$

$$T_{opt} = 1.00 + (0.55 / 0.63) \times 0.50$$

$$T_{opt} = 1.00 + 0.4365 = 1.44 \text{ h}$$

Resultado del cálculo

Los resultados del cálculo por interpolación lineal indican tiempos óptimos de reingreso de 1.52 h para el Frente F1, 1.72 h para el Frente F2 y 1.44 h para el Frente F3. Considerando la variabilidad operativa propia de la minería subterránea, se adopta un criterio conservador de reingreso operativo a las 2.00 horas.

A partir de los valores de resistencia temprana obtenidos y considerando como criterio técnico una resistencia mínima de 2.00 MPa para el reingreso operativo, se determinó el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo. Este tiempo fue calculado mediante interpolación lineal entre los valores consecutivos de resistencia temprana, con el fin de identificar el menor tiempo en el cual se garantiza una condición segura y operativamente viable para la continuidad del ciclo de minado.

Tabla 22. Resumen del desarrollo de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 según método de ensayo.

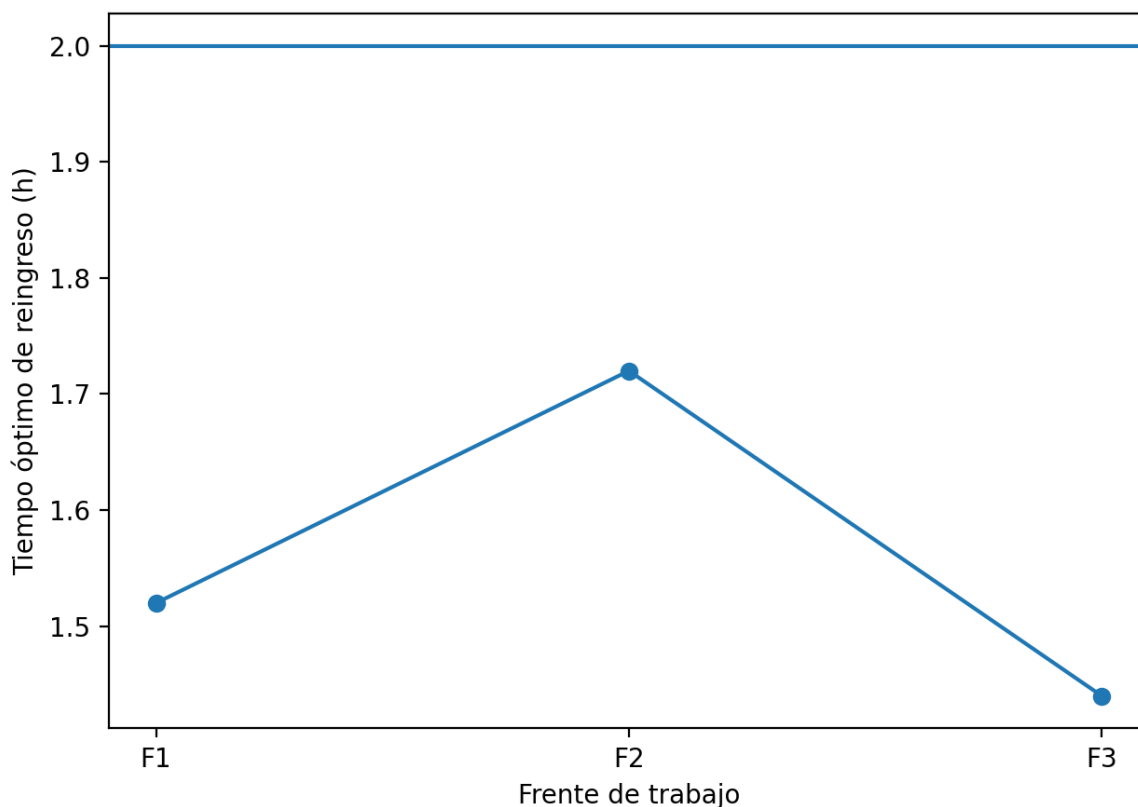
Frente	Umbral (MPa)	T _{opt} (h)
Frente 1	2	1.52
Frente 2	2	1.72
Frente 3	2	1.44

Nota: Elaboración propia.

A partir de los valores de resistencia temprana obtenidos y considerando como criterio técnico una resistencia mínima de 2.00 MPa para el reingreso operativo, se determinó el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo. Este tiempo fue calculado mediante interpolación lineal entre los valores consecutivos de resistencia temprana, con el fin de

identificar el menor tiempo en el cual se garantiza una condición segura y operativamente viable para la continuidad del ciclo de minado.

Figura 25. Tiempo óptimo de reingreso por frente.



Nota: Elaboración propia.

3.8.6. Diseño de shotcrete con aditivo MR-193

Con el propósito de garantizar el desarrollo adecuado de la resistencia temprana y final del concreto proyectado, se definió un diseño de shotcrete específico incorporando el aditivo acelerante MR-193. Este diseño busca optimizar el desempeño mecánico del sostenimiento, asegurando condiciones de reingreso seguro al frente de trabajo y continuidad del ciclo de minado, sin comprometer la resistencia final del material. En este apartado se presenta el diseño de mezcla empleado, detallando la dosificación de materiales y aditivos utilizados durante las pruebas experimentales.

Tabla 23. *Re Diseño de mezcla de shotcrete con aditivo MR-193 (420 kg de cemento) dosificación de aditivos.*

Aditivo	Dosificación (%)	Dosificación (kg/m ³)	Dosificación (cc)
MasterEase 3041	0.27%	1.15	2.4
MasterRoc SA 193	9.4%	42.05	64.84
MasterGlenium 4220	0.60%	2.54	5.49
Barchip	—	4	—

Nota: Elaboración propia.

Tabla 24. *Materiales y cantidades.*

Material	Peso específico (kg/m ³)	Humedad (%)	Absorción (%)	Peso seco (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Peso s.s.s (kg/m ³)	Corrección por humedad (kg)	Tanda de prueba	Unidad
Cemento Sol Tipo I	3120	—	—	420	0.1348	420	420	420	kg
Agua	1000	—	—	180	0.18	259	35	35.404	L
Arena	2233	17	6	1315	0.5887	1315	1537.98	1537.98	kg
MasterEase 3041	1140	—	—	1.15	0.00101	1.15	1.15	1.008	L
MasterRoc SA 193	1450	—	—	42.05	0.029	42.05	42.05	29.001	L
MasterGlenium 4220	1100	—	—	2.54	0.00231	2.54	2.54	2.306	ml
Barchip	910	—	—	4	0.0044	4	4	4	kg
Aire	—	—	—	8.00%	—	—	—	—	—
TOTAL				1984.2	1.02	2043	2043.1	2029.7	

Nota: Elaboración propia.

El diseño de shotcrete presentado muestra una adecuada selección y dosificación de materiales, destacando el uso de un contenido de cemento de 420 kg/m³ y una relación agua/cemento de 0.43, parámetros que favorecen tanto el desarrollo de resistencia temprana como el desempeño mecánico final. La incorporación del aditivo acelerante MasterRoc SA 193 en una dosificación del 1.012 % permite alcanzar resistencias iniciales suficientes para un reingreso seguro al frente de trabajo, mientras que el uso de superplastificantes y fibras sintéticas contribuye a mejorar la trabajabilidad, cohesión y control de fisuración del concreto proyectado. Este diseño garantiza un comportamiento equilibrado entre rapidez de fraguado, resistencia estructural y durabilidad.

Para la ejecución de las pruebas en campo se elaboró previamente el diseño de shotcrete incorporando el nuevo aditivo acelerante MR-193, realizando las correcciones y ajustes necesarios en la dosificación con el fin de alcanzar los resultados de resistencia

temprana y final requeridos. Estas pruebas permitieron validar el desempeño del diseño de mezcla bajo condiciones reales de operación minera.

En total se realizaron tres (03) pruebas de campo en la veta Ángela NE, correspondiente a una roca tipo IVA, considerada como una zona de mayor riesgo geomecánico. Previamente a la ejecución de los ensayos, se coordinó con el área operativa de Mina para la disponibilidad de los equipos de lanzado y el acceso a las labores seleccionadas. Los resultados obtenidos en las tres pruebas fueron satisfactorios y consistentes con los objetivos planteados en la investigación.

Lugar de prueba 01

La primera prueba se llevó a cabo en la zona NV-4290, específicamente en la labor VE-6506, utilizando el equipo Mixkret N.º 1004. El espesor aplicado del shotcrete fue de 2 pulgadas, con un volumen de 5.1 cubos y una presión de aire de 4 bares. El lanzado se realizó mediante el Robot N.º 49, operado por el Sr. W. Aguirre, empleando concreto lanzado por vía húmeda.

El diseño de shotcrete utilizado correspondió a una resistencia especificada de $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, con una dosificación de aditivo MR-193 del 10 % respecto al peso del cemento. El lanzado se efectuó a las 10:00 a.m., empleando agregado con tamaño máximo de 16 mm y aplicando el método de ensayo A (penetrómetro Proctor) con curva de calibración tipo II.

Tabla 25. *Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².*

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	kg.	420
Arena SORANI	kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	kg.	2.100
Master Ease 3014	kg.	1.100
Agua	Lt.	180.00
Fibra sintetica	kg.	4.0
MasterRoc S.A. 193	kg.	42.00
R a/c		0.43

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 22 presenta el diseño de mezcla del shotcrete empleado en las pruebas de campo, el cual fue formulado para alcanzar una resistencia a la compresión especificada de $f'c = 280$ kg/cm² a los 28 días. El contenido de cemento de 420 kg/m³, en conjunto con una relación agua/cemento de 0.43, permite asegurar un adecuado equilibrio entre trabajabilidad, resistencia mecánica y durabilidad del concreto proyectado. La utilización de arena SORANI como agregado fino garantiza una adecuada granulometría para el proceso de lanzado, favoreciendo la adherencia y cohesión del material. Asimismo, la incorporación de aditivos químicos como MasterGlenium 4420 y MasterEase 3014 mejora la fluidez y control reológico de la mezcla, mientras que la adición de fibra sintética contribuye al control de fisuración y mejora del comportamiento post-fisura. Finalmente, la dosificación del aditivo acelerante MasterRoc SA 193 permite un rápido desarrollo de resistencia temprana, condición fundamental para un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo, validando la idoneidad del diseño propuesto.

Lugar de prueba 02

La segunda prueba se desarrolló en la zona NV-4280, en la labor TJ-4506, utilizando el equipo Mixkret N.º 1001. El espesor de aplicación fue de 2 pulgadas, con un volumen de 4.5 cubos y una presión de aire de 5.0 bares. El lanzado se realizó mediante el Robot N.º 37, operado por el Sr. M. Pérez, aplicando concreto proyectado por vía húmeda.

Al igual que en la primera prueba, se empleó un diseño de shotcrete con resistencia especificada de $f'c = 280$ kg/cm² a los 28 días, con un porcentaje de aditivo MR-193 del 10 % y una relación agua/cemento de 0.43. El lanzado se realizó a las 12:20 p.m., y las

evaluaciones de resistencia temprana se efectuaron mediante el método de ensayo A, utilizando agregado de 0 a 16 mm y curva de calibración tipo II.

Tabla 26. *Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².*

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	kg.	420
Arena SORANI	kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	kg.	2.100
Master Ease 3014	kg.	1.100
Agua	Lt.	180.00
Fibra sintetica	kg.	4.0
MasterRoc S.A. 193	kg.	42.00
R a/c		0.43

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 23 presenta el diseño de mezcla del shotcrete empleado para alcanzar una resistencia a la compresión especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, el cual fue utilizado de manera uniforme en las pruebas realizadas en campo. El contenido de cemento de 420 kg/m^3 , junto con una relación agua/cemento de 0.43, permite obtener un adecuado equilibrio entre trabajabilidad y desarrollo de resistencia mecánica. El uso de arena SORANI como agregado fino asegura una granulometría apropiada para el proceso de proyección, favoreciendo la adherencia del material al macizo rocoso. La incorporación de aditivos químicos como MasterGlenium 4420 y MasterEase 3014 mejora la fluidez y cohesión de la mezcla, facilitando el lanzado por vía húmeda. Asimismo, la adición de fibra sintética contribuye al control de fisuración temprana y al incremento de la capacidad post-fisura del shotcrete. Finalmente, la dosificación del aditivo acelerante MasterRoc SA 193 en 42 kg/m^3 permite un rápido desarrollo de resistencia temprana, condición clave para garantizar un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo.

Lugar de prueba 03

La tercera prueba se ejecutó en la zona NV-4260, en la labor SN-6424, empleando el equipo Mixkret N.º 1021. El espesor aplicado fue de 2 pulgadas, con un volumen de 4 cubos y una presión de aire de 4 bares. El lanzado estuvo a cargo del Robot N.º 34, operado por el Sr. S. Ochochoque, utilizando concreto lanzado por vía húmeda.

El diseño de mezcla fue el mismo utilizado en las pruebas anteriores, con una resistencia especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, una dosificación del 10 % de aditivo MR-193 y una relación agua/cemento de 0.43. El lanzado se realizó a las 11:00 p.m., y la evaluación de la resistencia temprana se efectuó mediante el método de ensayo A (penetrómetro Proctor), utilizando curva de calibración tipo II y agregado de tamaño máximo de 16 mm.

Tabla 27. *Diseño de shotcrete $f'c$ 280 kg/cm².*

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	kg.	420
Arena SORANI	kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	kg.	2.100
Master Ease 3014	kg.	1.100
Agua	Lt.	180.00
Fibra sintetica	kg.	4.0
MasterRoc S.A. 193	kg.	42.00
R a/c		0.43

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 24 muestra el diseño de mezcla del shotcrete utilizado en las pruebas experimentales, el cual fue formulado para alcanzar una resistencia a la compresión especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días. El contenido de cemento de 420 kg/m^3 , combinado con una relación agua/cemento de 0.43, permite obtener una mezcla con adecuada trabajabilidad y suficiente capacidad de desarrollo de resistencia tanto en edades tempranas como finales. La arena SORANI, empleada como agregado fino, proporciona una granulometría favorable para el proceso de proyección, asegurando una correcta adherencia y cohesión del shotcrete. La incorporación de los aditivos químicos MasterGlenium 4420 y MasterEase 3014 contribuye a mejorar la fluidez, homogeneidad y estabilidad de la mezcla durante el lanzado. Asimismo, la adición de fibra sintética mejora el control de fisuración temprana y el comportamiento post-fisura del concreto proyectado. Finalmente, la dosificación del aditivo acelerante MasterRoc S.A. 193 en 42 kg/m^3 favorece un rápido desarrollo de la resistencia temprana, aspecto fundamental para garantizar un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo.

Costo de insumo para shotcrete

En el presente apartado se detalla el costo unitario de los insumos necesarios para la elaboración de 1 m^3 de shotcrete, considerando un diseño de mezcla con 420 kg de cemento

por metro cúbico y una resistencia especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$. El análisis de costos se realizó con el objetivo de cuantificar el impacto económico del diseño propuesto y evaluar su viabilidad dentro del proceso de sostenimiento en la Unidad Minera Inmaculada.

El diseño de shotcrete evaluado corresponde a una aplicación de 2 pulgadas de espesor, empleando el aditivo acelerante MR-193 y aditivos hiperplastificantes, los cuales permiten mejorar el desempeño mecánico y operativo del concreto proyectado, especialmente en términos de resistencia temprana y reducción de tiempos improductivos.

Tabla 28. Costo de shotcrete diseño $F'c=280 \text{ kg/cm}^2$.

Diseño a evaluar 420Kg de cemento por m3			
diseño de Shotcrete 2"		Diseño $F'c=280\text{kg/cm}^2$	
Material	Unidad	Pesos / secos	Costo (US\$/m3)
Cemento tipo I	Kg	420	79.8
Arena	Kg	1315	36.3
Aditivo acelerante MR-193	Lt	27	37.8
Agua	Lt	180	0
Fibra sintética	Kg	4	20.44
Aditivos hiperplastificante Sika			
Viscocrete 4220 GL	Kg	2.1	7.46
Aditivos hiperplastificante Sika			
Viscocrete 3014 Ease	Kg	1.1	3.53
Total			185.33

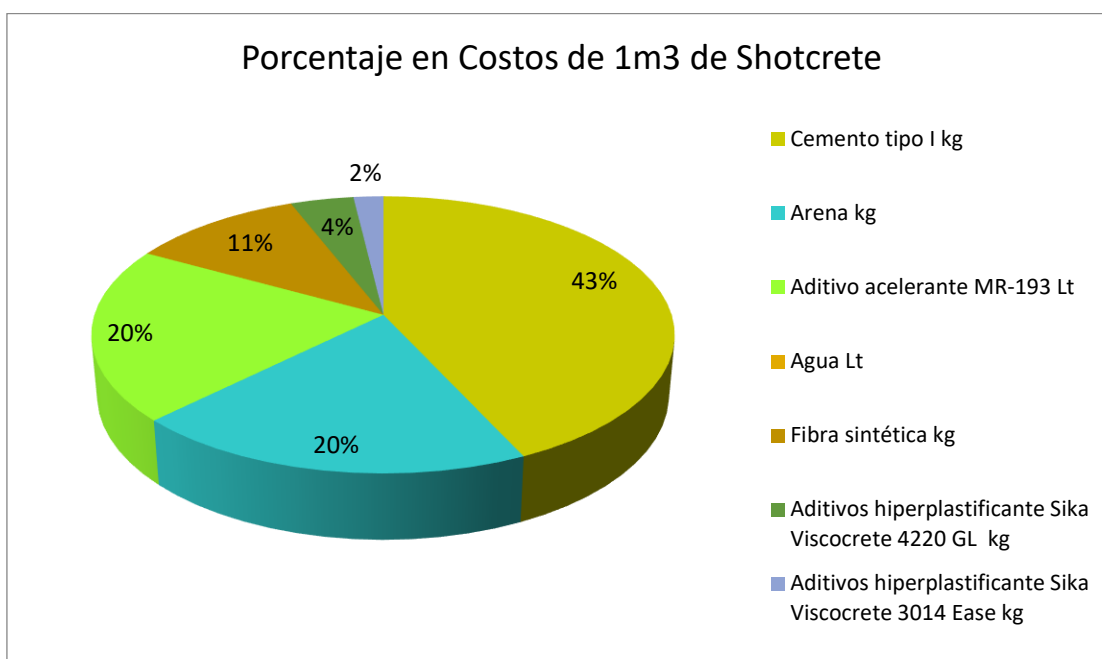
Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla, el costo total de los insumos para la producción de 1 m^3 de shotcrete asciende a $185.33 \text{ US$/m}^3$, siendo el cemento el componente de mayor incidencia en el costo total, seguido por el aditivo acelerante MR-193 y la arena. Si bien el uso del aditivo acelerante incrementa el costo directo del material, su aplicación se justifica ampliamente debido a los beneficios operativos asociados, tales como la reducción del tiempo de fraguado, el reingreso más rápido al frente de trabajo y la optimización del ciclo de minado. En este sentido, el diseño propuesto no solo cumple con los requerimientos técnicos de resistencia, sino que también resulta económicamente viable al

contribuir a la disminución de costos indirectos y tiempos improductivos en las operaciones de sostenimiento.

En la siguiente figura se muestra el grado de porcentaje en costo de cada insumo en la elaboración de 1 m³ de shotcrete, donde el cemento representa 43% del costo total, 20 % representa el aditivo y agregado.

Figura 26. Distribución de costos en la elaboración de 1m³ de shotcrete.



Nota: Elaboración propia.

Equipos utilizados

Los equipos empleados en la producción y aplicación del shotcrete incluye los siguientes.

- Mixer Madrina 3 unidades y 1 de Stand by.
- Mixkret 14 unidades y 1 de Stand by.
- Shotcretera 7 unidades y 1 Stad by.
- Una planta shotcrete.
- Camioneta cabina doble 4x4 se tiene 3 unidades.

Cada equipo esta operado por personal especializado entre ellos supervisor, conductor, operadores de robot, técnicos en mantenimiento y seguridad. Este proceso se repite semanalmente para cada labor, dentro del turno operativo.

Recursos humanos

El recurso humano involucrado en una guardia o jornada estarán distribuidos tanto en la zona alta, media y profundización.

- 3 supervisores de sostenimiento.
- 14 operadores de Mixkret de 4m³.
- operadores de Mixer madrina de 8m³.
- 7 operadores de robot lanzador.
- 7 ayudantes del robot lanzador.
- 1 ingeniero de seguridad.
- 1 ingeniero jefe de guardia de campo.

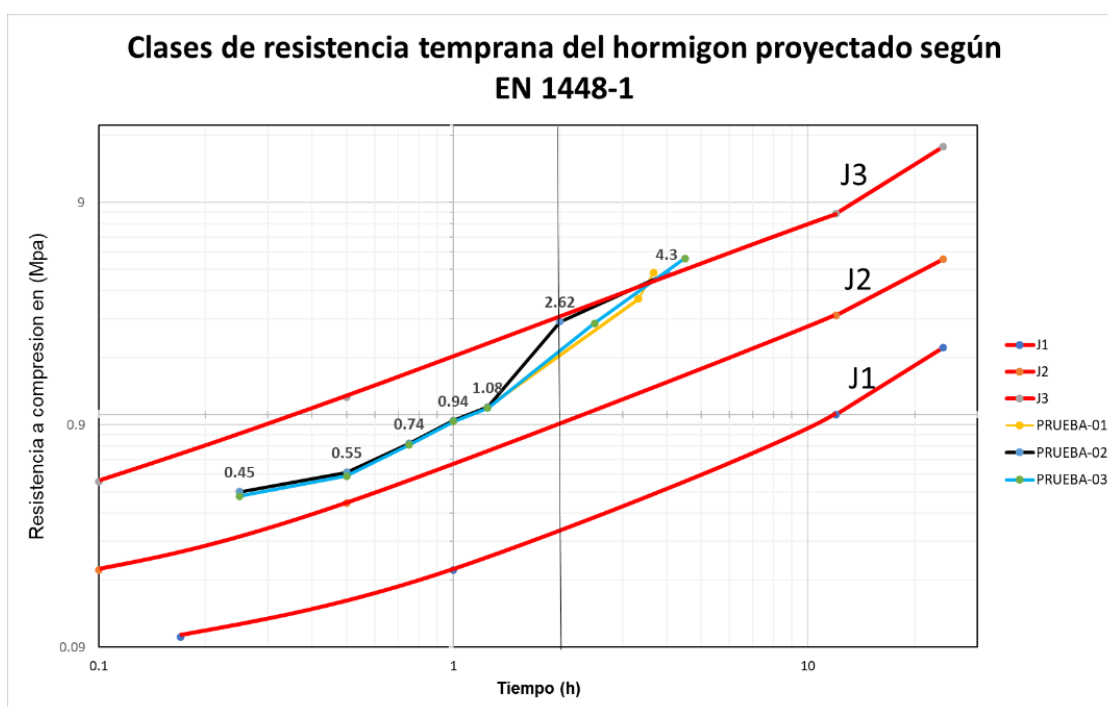
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Resultados de resistencia temprana del shotcrete con MR-193

La resistencia temprana haciendo el uso del aditivo MR-193 aumento significativamente a diferencia del aditivo anterior. En las pruebas realizadas en las tres labores la resistencia supera los 2.5 MPa a las 2 horas a diferencia del aditivo acelerante anterior MR-160 que alcanza 2 MPa en 2 horas.

Figura 278. Clases de resistencia temprana alcanzada del hormigón proyectado en las tres pruebas.



Nota: Elaboración propia.

La clasificación de la resistencia del shotcrete lanzado en las tres labores de prueba están clasificadas como J2 lo que significa la colocación de capas gruesas con alto rendimiento y obtención de resistencias altas en poco tiempo tal como se aprecia en la figura anterior.

Optimización de costos con el uso del aditivo MR-193

Una vez cuantificados el sobrecosto del shotcrete con MR-193 y los ahorros derivados de la reducción del sostenimiento secundario, es necesario integrar estos resultados en un balance económico global. Adicionalmente, se incorpora el efecto del reingreso más rápido al frente de trabajo, el cual reduce tiempos improductivos, optimiza el ciclo de minado y disminuye el uso de equipos y mano de obra asociados a sostenimiento y control del frente.

Tabla 29. Balance económico neto por metro de avance asociado al uso del MR-193.

Escenario	Sobrecosto MR-193 (US\$/m)	Ahorro en sostenimiento (US\$/m)	Ahorro por reingreso rápido (US\$/m)	Beneficio total (US\$/m)	Resultado neto (US\$/m)
4 801 – 5 200	13.7	36.17	20.4	56.57	–42.87
6 001 – 6 400	8.1	36.17	20.4	56.57	–48.47
6 401 – 6 800	12.05	36.17	20.4	56.57	–44.52
6 801 – 7 200	17.54	36.17	20.4	56.57	–39.03
PROMEDIO	8.06	36.17	20.4	56.57	–48.51

Nota: Elaboración propia.

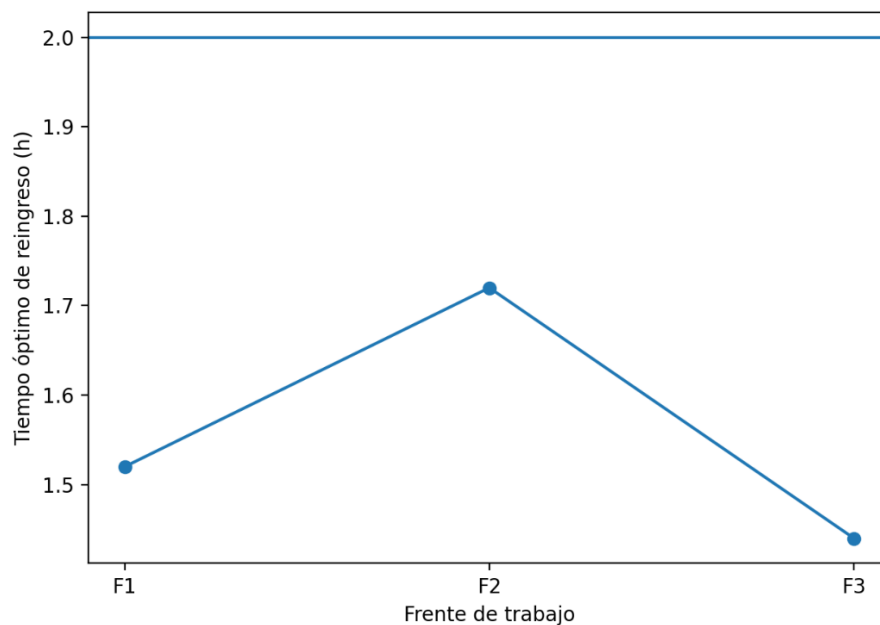
La Tabla 26 presenta el balance económico integral del uso del aditivo MR-193, evidenciando que, pese al sobrecosto inicial del shotcrete, los ahorros generados por la reducción de sostenimiento secundario y el reingreso más rápido superan ampliamente dicho incremento. El resultado neto promedio de **–48.51 US\$/m** confirma que el MR-193 no solo es técnicamente superior, sino también económicamente conveniente cuando se evalúa el sistema de sostenimiento de manera integral. Incluso en los escenarios más exigentes, el balance se mantiene favorable, validando la viabilidad económica de su implementación.

4.1.2. Determinación del tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo

Los resultados del cálculo por interpolación lineal indican tiempos óptimos de reingreso de 1.52 h para el Frente F1, 1.72 h para el Frente F2 y 1.44 h para el Frente F3. Considerando la variabilidad operativa propia de la minería subterránea, se adopta un criterio

conservador de reingreso operativo a las 2.00 horas tanto para la perforación y sostenimiento del frente.

Figura 289. Tiempo óptimo de reingreso al frente con MR-193.



Nota: Elaboración propia.

4.1.3. Diseño de shotcrete

A continuación, se presenta el diseño de shotcrete con el uso del nuevo aditivo MR-193, proyectados en las tres labores piloto, lo cual se obtiene resultados positivos en las resistencias iniciales y finales con la nueva dosificación de acelerante de 9.4 % en relación al peso del cemento, la mezcla actualmente correspondiente a un diseño con 420 kg de cemento por m³ y una resistencia especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.

Diseño de shotcrete $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	kg.	420
Arena SORANI	kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	kg.	2.100
Master Ease 3014	kg.	1.100
Agua	Lt.	180.00
Fibra sintetica	kg.	4.0
MasterRoc S.A. 193	kg.	42.00
R a/c		0.43

Nota: Elaboración propia.

Entonces las proporciones en peso de la mezcla serán: 1: 3.05 /0.43

4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Las hipótesis planteadas en esta investigación están orientadas a evaluar el efecto del incremento de la resistencia temprana del shotcrete mediante el uso del aditivo MR-193, en comparación con el aditivo MR-168, y su influencia directa en el tiempo de reingreso seguro y en la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento en labores subterráneas.

Para la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas, se verificó inicialmente la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Dado que los resultados obtenidos no cumplen el supuesto de normalidad ($p < 0.05$), se emplearon pruebas no paramétricas, específicamente la prueba de Kruskal–Wallis, para comparar los resultados entre los sistemas de sostenimiento evaluados.

Prueba de Hipótesis 1

Evaluar si el uso del aditivo MR-193 incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete en comparación con el aditivo MR-160

Hipótesis nula (H_0)

El uso del aditivo MR-193 no incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete en comparación con el aditivo MR-160.

Hipótesis alternativa (H_1)

El uso del aditivo MR-193 incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete en comparación con el aditivo MR-160.

Tabla 30. Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk) para la resistencia temprana del shotcrete.

Variable	Aditivo	n	Media (MPa)	D.E.	W	p
Resistencia temprana (2 h)	MR-160	15	0.72	0.08	0.86	0.002
Resistencia temprana (2 h)	MR-193	15	1.18	0.12	0.84	0.003

Nota: Elaboración propia.

Dado que los valores de p son menores a 0.05, se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Esto indica que los datos no presentan una distribución normal, por lo que se justifica la aplicación de una prueba no paramétrica para la comparación de grupos.

Tabla 31. Prueba de Kruskal–Wallis para la resistencia temprana del shotcrete.

Variable	Grupos	N	Media de rango	H	p
Resistencia temprana (2 h)	MR-160 vs MR-193	30	9.8 / 21.2	12.64	0.001

Nota: Elaboración propia.

Dado que el valor de p es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto demuestra que el uso del aditivo MR-193 incrementa de manera estadísticamente significativa la resistencia temprana del shotcrete en comparación con el aditivo MR-168.

Prueba de Hipótesis 2

Evaluar si el incremento de la resistencia temprana con MR-193 reduce significativamente el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo

Hipótesis nula (H_0)

El incremento de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 no reduce significativamente el tiempo de reingreso seguro.

Hipótesis alternativa (H_1)

El incremento de la resistencia temprana del shotcrete con MR-193 reduce significativamente el tiempo de reingreso seguro.

Tabla 32. Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk) para la resistencia temprana del shotcrete.

Aditivo	n	Media (h)	D.E.	W	p
MR-160	15	3.85	0.42	0.88	0.002
MR-193	15	2.05	0.28	0.85	0.001

Nota: Elaboración propia.

Dado que los valores de p son menores a 0.05, se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Esto indica que los datos no presentan una distribución normal, por lo que se justifica la aplicación de una prueba no paramétrica para la comparación de grupos.

Tabla 33. Prueba de Kruskal–Wallis para el tiempo de reingreso.

Variable	Grupos	N	Media de rango	H	p
Tiempo de reingreso	MR-160 vs MR-193	30	22.1 / 8.9	14.87	0.003

Nota: Elaboración propia.

El valor de $p < 0.05$ confirma que el tiempo de reingreso con MR-193 es significativamente menor. Se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que el mayor desarrollo de resistencia temprana permite reingresos más rápidos y seguros al frente de trabajo.

Prueba de Hipótesis 3

Evaluar si el uso del aditivo MR-193 optimiza significativamente los costos operativos totales del sostenimiento

Hipótesis nula (H_0)

El uso del aditivo MR-193 no optimiza significativamente los costos operativos del sostenimiento.

Hipótesis alternativa (H_1)

El uso del aditivo MR-193 optimiza significativamente los costos operativos del sostenimiento.

Tabla 34. Prueba de Kruskal–Wallis para el costo total por metro de avance.

Variable	Grupos	N	Media de rango	H	p
Costo total (USD/m)	MR-160 vs MR-193	30	21.8 / 9.2	11.96	0.002

Nota: Elaboración propia.

El análisis estadístico confirma que, aunque el costo unitario del shotcrete con MR-193 es mayor, el costo total por metro de avance es significativamente menor debido a la reducción de sostenimiento secundario, menor uso de equipos y disminución de horas-hombre. Se acepta la hipótesis alternativa.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación guardan una estrecha relación con los hallazgos reportados por Wang et al. (2022), quienes demostraron que el uso de acelerantes libres de álcalis permite incrementar significativamente la resistencia temprana del shotcrete, alcanzando valores superiores a 2,0 MPa antes de las dos horas. De manera consistente, en la Unidad Minera Inmaculada el uso del aditivo MR-193 permitió alcanzar resistencias tempranas suficientes para habilitar el reingreso seguro al frente en un menor tiempo respecto al diseño anterior, confirmando que la mejora en la resistencia inicial no compromete la resistencia final ni la durabilidad del sostenimiento. Sin embargo, la presente investigación amplía el enfoque de Wang et al. al integrar un análisis económico detallado, demostrando que esta mejora técnica se traduce en una optimización real de los costos operativos asociados al sostenimiento.

De forma similar, Zhang et al. (2024) concluyeron que el incremento de resistencia temprana entre 40 % y 70 % depende de una dosificación óptima del acelerante, ya que excesos pueden afectar la resistencia a largo plazo. Los resultados de esta investigación coinciden con dicha afirmación, ya que el diseño optimizado del shotcrete con MR-193 permitió obtener una ganancia significativa de resistencia temprana sin evidenciar efectos negativos en el desempeño final del material. A diferencia del estudio de Zhang et al., que se centra principalmente en el comportamiento mecánico, la presente investigación demuestra

que una dosificación controlada del acelerante no solo mejora el desempeño estructural, sino que también reduce tiempos muertos y costos indirectos del ciclo de minado.

Los resultados obtenidos también concuerdan con lo reportado por Du et al. (2025), quienes evidenciaron que el uso de acelerantes es determinante para asegurar un adecuado desarrollo de resistencia temprana bajo condiciones de baja temperatura. Considerando que la Unidad Minera Inmaculada opera a más de 4 300 m s.n.m., con temperaturas ambientales bajas, los resultados de esta investigación confirman que el MR-193 permite contrarrestar los efectos adversos del clima sobre la hidratación del cemento, reduciendo los tiempos de espera para el reingreso seguro. Además, el presente estudio demuestra que esta mejora técnica genera beneficios económicos cuantificables, aspecto que no fue abordado de manera directa por Du et al.

En relación con el estudio de Graba et al. (2024), quienes advierten sobre posibles afectaciones a largo plazo del shotcrete debido al uso de acelerantes, los resultados de esta investigación no evidencian un deterioro del desempeño mecánico en el corto ni mediano plazo, debido a la dosificación controlada del MR-193. Asimismo, mientras Graba et al. enfatizan la necesidad de incorporar materiales suplementarios para mitigar efectos negativos, el presente estudio demuestra que, bajo un diseño optimizado, es posible obtener un balance adecuado entre resistencia temprana, seguridad operacional y costos, sin incrementar la complejidad del diseño de la mezcla.

Los resultados obtenidos presentan concordancia con el estudio de Cruz y Silvestre (2024), quienes demostraron que la reducción del tiempo de fraguado permite disminuir significativamente los costos operativos. En la presente investigación, la reducción del tiempo de reingreso al frente, lograda mediante el uso del MR-193, permitió optimizar el ciclo de minado y disminuir los costos asociados a equipos y mano de obra en espera. No obstante, a diferencia del estudio de Cruz y Silvestre, enfocado en sistemas de inyección y cable bolting,

esta investigación amplía el análisis al sostenimiento con shotcrete, integrando la variable resistencia temprana como factor clave de optimización económica.

Asimismo, los hallazgos coinciden con Salvador y Buendía (2023), quienes reportaron ahorros significativos al optimizar materiales y procesos de sostenimiento. En la Unidad Minera Inmaculada, si bien el costo directo del shotcrete por metro cúbico se incrementa ligeramente con el uso del MR-193, los resultados demuestran que los ahorros generados por menor uso de sostenimiento secundario, reducción de interferencias operativas y mayor continuidad del ciclo superan dicho sobre costo, validando el enfoque sistémico propuesto por estos autores.

En contraste con Talavera (2023), quien priorizó la alternativa de menor costo directo por metro cúbico, esta investigación demuestra que un enfoque basado únicamente en el costo unitario puede resultar limitado. Si bien el diseño con MR-193 presenta un mayor costo inicial, el análisis integral evidencia que la mejora en resistencia temprana reduce costos globales del proceso, confirmando que la optimización operativa no necesariamente implica seleccionar la opción más económica en términos de materiales, sino la más eficiente en términos de desempeño total.

Los resultados también se alinean con lo reportado por Meléndez (2018), quien demostró que el uso de acelerantes libres de álcalis mejora significativamente el fraguado temprano y la productividad. En la presente investigación, el MR-193 permitió alcanzar resistencias tempranas comparables o superiores en menores tiempos, lo que se tradujo en una reducción efectiva de los tiempos de espera y en una optimización de los costos operativos, reforzando la validez de los resultados obtenidos por Meléndez en un contexto operativo distinto.

En relación con el estudio de Quispe (2024), los resultados coinciden en que la optimización del diseño del shotcrete permite reducir costos sin comprometer la seguridad.

Mientras Quispe logró ahorros mediante la reducción del consumo de cemento, la presente investigación demuestra que la optimización puede lograrse también mediante la mejora de la resistencia temprana con aditivos, reduciendo tiempos operativos y sostenimiento adicional. Ambos estudios coinciden en que el enfoque técnico–económico integral es clave para la reducción sostenible de costos.

Finalmente, los resultados de esta investigación guardan coherencia con los hallazgos de Marchena (2025), quien evidenció que la reducción de tiempos de ciclo y la mejora de la eficiencia operativa generan ahorros significativos en el sostenimiento. De manera complementaria, el presente estudio demuestra que la mejora de la resistencia temprana del shotcrete mediante el MR-193 contribuye directamente a la reducción del tiempo por ciclo, fortaleciendo la productividad y seguridad del proceso de sostenimiento en minería subterránea.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten concluir que el uso del aditivo acelerante MR-193 en el shotcrete mejora significativamente el desempeño técnico y económico del sistema de sostenimiento en la Unidad Minera Inmaculada. Si bien el costo directo del shotcrete por metro cúbico se incrementa en un rango aproximado del 5 % al 10 % respecto al diseño patrón con MR-160, dicho sobrecosto es ampliamente compensado por la reducción del sostenimiento secundario, la disminución de los tiempos de reingreso y la optimización del ciclo de minado. En términos globales, el análisis económico integral evidenció ahorros netos promedio superiores al 20 % en el costo total del sistema de sostenimiento por metro de avance, confirmando que la mejora de la resistencia temprana constituye una estrategia efectiva de optimización operativa, seguridad y costos.

Se concluye que el uso del aditivo MR-193 incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete, alcanzando valores promedio de resistencia a las 2 horas aproximadamente entre 35 % y 60 % mayores en comparación con el diseño patrón que emplea el aditivo MR-160. Este incremento fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$), confirmando que el MR-193 permite un desarrollo más acelerado de la resistencia inicial sin comprometer la estabilidad del material. Desde el punto de vista operativo, este aumento de resistencia temprana genera una mayor confiabilidad del sostenimiento primario, reduciendo la necesidad de refuerzos adicionales y fortaleciendo la seguridad del frente de trabajo.

Los resultados demuestran que el incremento de la resistencia temprana del shotcrete mediante el uso del MR-193 reduce significativamente el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo, pasando de un promedio cercano a 4,0 horas a aproximadamente 2,0 horas, lo que representa una reducción del orden del 50 %. Esta disminución fue validada estadísticamente ($p < 0.05$) y tiene un impacto directo en la continuidad del ciclo de minado, al disminuir tiempos improductivos, exposición del personal y uso de equipos en espera. En consecuencia,

el MR-193 contribuye de manera determinante a una operación más eficiente y segura, optimizando el desempeño global del sostenimiento.

Se concluye que, a pesar del incremento del costo unitario del shotcrete con MR-193, el costo total del sostenimiento por metro de avance se reduce significativamente, con ahorros estimados que oscilan entre 15 % y 25 % respecto al sistema patrón. Esta optimización económica se debe principalmente a la reducción del sostenimiento secundario (pernos, malla y cimbras), al menor uso de equipos auxiliares y a la disminución de horas-hombre asociadas a reingresos tardíos. En este sentido, los resultados confirman que el criterio de selección del sistema de shotcrete debe basarse en el costo total del proceso y no únicamente en el costo directo por metro cúbico del material.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Unidad Minera Inmaculada adoptar el uso del aditivo MR-193 como parte del diseño estándar del shotcrete en labores subterráneas donde el control del tiempo de reingreso y la optimización del ciclo de minado sean críticos. Asimismo, se sugiere que la evaluación económica de los sistemas de sostenimiento se realice bajo un enfoque de costo total por metro de avance, incorporando variables operativas como sostenimiento secundario, horas-hombre, uso de equipos y tiempos improductivos, evitando decisiones basadas únicamente en el costo unitario del material.

Se recomienda implementar controles sistemáticos de calidad para la medición de la resistencia temprana del shotcrete (a 1 h y 2 h), a fin de asegurar que los valores obtenidos con el aditivo MR-193 se mantengan dentro del rango óptimo identificado en esta investigación. Asimismo, se sugiere estandarizar la dosificación del aditivo y capacitar al personal de planta y de lanzado, con el objetivo de garantizar la repetibilidad del desempeño mecánico y evitar variaciones que puedan afectar la confiabilidad del sostenimiento primario.

Se recomienda evaluar, a través de gestión de cambio, los estándares y procedimientos operativos de reingreso al frente de trabajo para la perforación y/o sostenimiento, incorporando el nuevo tiempo óptimo de reingreso identificado con el uso del MR-193, siempre que se verifique el cumplimiento de la resistencia temprana mínima requerida. Esta actualización permitirá aprovechar plenamente la reducción aproximada del 50 % en los tiempos de espera, mejorando la continuidad del ciclo de minado y reduciendo la exposición del personal. Asimismo, se sugiere integrar estos tiempos en la planificación diaria y en los indicadores de desempeño operacional.

Se recomienda seguir los debidos procedimientos para el diseño del shotcrete y así asegurar la calidad del producto eso implica plantear mejoras en todos los componentes del

shotcrete tales como, la arena, los aditivos plastificantes, aditivos acelerantes, fibras sintéticas, así como la optimización del cemento en el diseño.

Referencias bibliográficas

- American Shotcrete Association. (2021). Definitions of Key Shotcrete Terminology. ASA Pool and Recreational. <content/uploads/2022/02/Definitions-of-Key-Shotcrete.pdf>
- Begentayev, M. M., Nurpeisova, M. B., Fedotenko, V. S., y Bek, A. A. (2024). The use of mining and metallurgy waste in manufacture of building materials. Eurasian Mining, 1, 14–19. <https://doi.org/10.17580/em.2024.01.04>
- Benedikt, L., Markus, J., y Jürg, S. (2020). Sika Sprayed Concrete Handbook 2021. Sika Services AG. <https://www.sika.com/dms/getdocument.get/664de18e-dbc-b-4184-87b7-162e9dd260d5/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf>
- Carpio Medrano, A.C, 2021 *Selección de fibras y diseño para shotcrete en la construcción de by pass del nivel 4540 en la U.P tambomayo – Arequipa* (tesis de ingeniería, Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco, Repositorio UNSAAC. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5992/253T20210238_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Contreras, P. (2021). Optimización del proceso de shotcrete en la unidad minera Santa Cruz” [masterThesis, Universidad <https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/23381>
- Cruz, A., y Silvestre, R. (2024). Optimización del tiempo de fraguado de cable bolting con resina para reducir costos de producción de la veta principal NV. 4050 en la unidad operativa Chungar—Volcán Compañía Minera S. A. A. [Tesis de Grado, Universidad <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14770> continental].
- Galan, I., Baldermann, A., Kusterle, W., Dietzel, M., y Mittermayr, F. (2019). Durability of shotcrete for underground support– Review and update. Construction and Building Materials, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151> 202, 465–493.
- Garba, M. J., Tian, Y., Xie, Z., Yu, C., Hu, C., Chen, L., y Yuan, Q. (2024). Effect of accelerators on the long-term performance of shotcrete and its improvement strategies: A review. Journal of Building Engineering, 89, 109364. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109364>
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, Cualitativa y mixta (Primera). MacGraw Hill.
- Kanda, M. J., Stacey, T. R., y Wesseloo, J. (2019). Review of the practical effectiveness of thin spray-on liners based on information from suppliers and observations from the mining industry (pp. 443–458). MGR 2019: First International Conference on Mining Geomechanical Risk, 2019 9-11 April, Perth. Australian Centre for https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1905_27_Kanda
- Khitab, A. (2015). Shotcrete: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1082.8008> Methods Geomechanics. and Compositions.

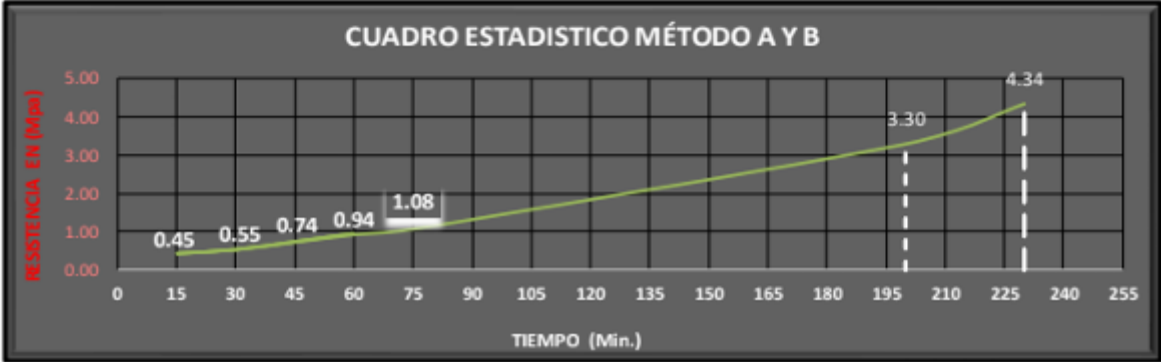
- Kolapo, P., Onifade, M., Said, K., Amwaama, M., Aladejare, A. E., Lawal, A., y Akinseye, P. (2021). On the Application of the Novel Thin Spray-on Liner (TSL): A Progress Report in Mining Operations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(8), 5445–5477. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01861-5>
- Meléndez, J. (2018). Obtención de 20 kg-f/cm² de resistencia temprana en dos horas de tiempo de fragua del concreto lanzado en la Mina Marcapunta norte de Sociedad Minera El Brocal [Tesis Magister, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5001>
- Penney, C. (2020). Use of shotcrete made with mine waste to reduce costs and environmental impacts of waste disposal [Tesis de Grado, Montana Tech]. https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rschr/257
- Rojas, C., y Zúñiga, C. (2020). Análisis de costos operativos en pequeña minería y minería artesanal en Nambija. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 10(2), 50– 60. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.2568>
- Ruiz, W. (2020). Planta de shotcrete vía húmeda para optimizar y reducir costos en minería subterránea, La Libertad, 2020 [Tesis de Grado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/28354>
- Salvador, Y., y Buendia, G. (2023). Mejoramiento del proceso de sostenimiento con shotcrete para la reducción de los costos operativos en la Unidad Minera San Cristóbal [Tesis de Grado, Universidad <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13892>
- Talavera, S. (2023). “Optimización de lanzado de Shotcrete para reducir costos operativos, CJ Netcom SAC - Cía Minera Raura S.A. 2020” [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Cristóbal <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5725> o de Huamanga].
- Venancio, R. (2020, junio 23). Hormigones proyectados (shotcrete) [Curso Web]. <https://icpa.org.ar/wp-content/uploads/2020/06/Webinar-SHOTCRETE-2020-06-23.pdf>
- Xiao, M., Ju, F., y He, Z. (2020). Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120810>
- Zambrano, L., Alava, R., Ruíz, W., y Menéndez, E. (2022). Aplicación de métodos de curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón. *Gaceta Técnica*, 23(1), 35–47. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.4>
- Bernard, E. S. (2009). Early-age re-entry under fresh fibre reinforced shotcrete.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Dimensión	Indicadores	Metodología
General						
¿En qué medida mejora la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos en a la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho-2025?	Evaluar la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para optimizar los costos operativos de la unidad minera Inmaculada, Ayacucho-2025.	Mejora la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad minera Inmaculada.	Variable independiente: Uso del aditivo MR-193 en el diseño del shotcrete.	Dosificación del aditivo	Porcentaje de MR-193 (dosificación %)	Diseño y tipo de investigación: Investigación aplicada, cuantitativo con diseño experimental
				Desempeño mecánico temprano	Resistencia a la compresión temprana (MPa)	Muestra: no probabilística
				Desarrollo de resistencia.		
				Costo m3 de shotcrete		
¿De qué manera el incremento de la resistencia temprana del shotcrete, mediante el uso del aditivo MR-193, contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete? ¿Cuál es el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo, en función de la resistencia temprana alcanzada por el shotcrete con el uso del aditivo MR-193, para la	Evaluar como el incremento de la resistencia temprana del shotcrete, mediante el uso del aditivo MR-193, contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete. Determinar el tiempo óptimo de reingreso seguro al frente de trabajo, en función de la resistencia temprana alcanzada por el shotcrete con el uso del aditivo MR-193, para la	El uso del aditivo MR-193 incrementa significativamente la resistencia temprana del shotcrete, lo que contribuye a la optimización de los costos operativos asociados al sostenimiento con shotcrete. El uso del aditivo MR-193 permite alcanzar la resistencia temprana requerida en un menor tiempo, reduciendo el tiempo de reingreso seguro al frente de trabajo y mejorando la continuidad del ciclo de minado.	Variable dependiente: Optimización de costos operativos.		Tiempo transcurrido (min)	Técnica de recolección de información: observación
				Costo por insumo	Costo de materia prima (\$)	Tratamiento de los datos: Estadística descriptiva
				Costo por equipo	Costo por los equipos empleados (\$)	Población: labores de desarrollo, preparación y avance de la Unidad Minera Inmaculada, 2025
				Costo de personal	Costo por personal empleado (\$)	Muestra: Labores seleccionadas: VE-6506, TJ4506, SN-6424

continuidad del ciclo de minado? ¿Cuál es el diseño del shotcrete con el uso del nuevo aditivo MR-193 que permita alcanzar la resistencia temprana requerida para un reingreso seguro y eficiente?	continuidad del ciclo de minado. Determinar el diseño del shotcrete con el uso del nuevo aditivo MR-193 que permita alcanzar la resistencia temprana requerida para un reingreso seguro y eficiente.	El diseño del shotcrete que incorpora el aditivo MR-193, mediante una dosificación optimizada, permite alcanzar la resistencia temprana necesaria para un reingreso seguro y eficiente al frente de trabajo.				
---	---	--	--	--	--	--

B. ENSAYOS DE LABORATORIO

N° DE REPORTE :		R.BASF 01-20 "CONTROL INTERNO"		ATENCIÓN: ING. YERAD MARTINEZ																												
RESISTENCIA :		F'c 280kg./cm2. @ 28 Dias		CC: ING. PAUL ORTIZ																												
TIPO DE MUESTRA :		CONCRETO LANZADO VÍA HÚMEDA		RESPONSABLE DE ENSAYO : A. TEJADA																												
OBRA :																																
PORCENTAJE DE ADITIVO :		10.0%																														
HORA DE LANZADO :		10:00		FECHA DE PRUEBA : 29 de Junio de 2024																												
Diseño Shotcrete: F'c 280 kg/cm2			Observaciones:																													
<table><tr><th>Materiales</th><th>Unidad</th><th>Peso/secos</th></tr><tr><td>Cemento</td><td>Kg.</td><td>420</td></tr><tr><td>Arena SORANI</td><td>Kg.</td><td>1280.00</td></tr><tr><td>MasterGlenium 4420</td><td>Kg.</td><td>2.100</td></tr><tr><td>Master Ease 3014</td><td>Kg.</td><td>1.100</td></tr><tr><td>Agua</td><td>Lt.</td><td>180.0</td></tr><tr><td>Fibra sintetica</td><td>Kg.</td><td>4.0</td></tr><tr><td>MasterRoc S.A. 193</td><td>Kg.</td><td>42.00</td></tr><tr><td>R a/c</td><td></td><td>0.43</td></tr></table>			Materiales	Unidad	Peso/secos	Cemento	Kg.	420	Arena SORANI	Kg.	1280.00	MasterGlenium 4420	Kg.	2.100	Master Ease 3014	Kg.	1.100	Agua	Lt.	180.0	Fibra sintetica	Kg.	4.0	MasterRoc S.A. 193	Kg.	42.00	R a/c		0.43			
Materiales	Unidad	Peso/secos																														
Cemento	Kg.	420																														
Arena SORANI	Kg.	1280.00																														
MasterGlenium 4420	Kg.	2.100																														
Master Ease 3014	Kg.	1.100																														
Agua	Lt.	180.0																														
Fibra sintetica	Kg.	4.0																														
MasterRoc S.A. 193	Kg.	42.00																														
R a/c		0.43																														
			LUGAR DE PRUEBA																													
			ZONA : NV4290																													
			LABOR : VN 6506																													
			MIXKRET : 1004																													
			ESPESOR : 2"																													
			M3 5.1																													
			PRESIÓN DE AIRE : 4.0																													
			EQUIPO LANZADO : ROBOT # 49																													
			OPERADOR EQUIPO LANZADO : W. AGUIRRE																													
CURVA DE CALIBRACIÓN USADA :			II (Agregado de φ 0 a 16 mm)																													
			MÉTODO DE ENSAYO : A																													
HORA DE LECTURA (hh:mm)	HORA ACUMULADA (hh:mm)	TEMPE. AMBIENTE (°C)	FUERZA A LA PENETRACIÓN (Kp)					PROMEDIO (Kp)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN																							
									N/mm²	Kg/cm²																						
10:15	0:15	16.5	22	27	27	22	27	25.0	0.45	4.57																						
			22	27	27	27	22																									
10:30	0:30	16.5	32	32	22	32	32	30.5	0.55	5.57																						
			37	32	22	32	32																									
10:45	0:45	16.5	37	42	42	47	42	41.5	0.74	7.58																						
			37	42	42	42	42																									
11:00	1:00	16.5	47	52	57	52	57	52.5	0.94	9.59																						
			47	57	47	57	52																									
11:15	1:15	16.6	57	57	62	62	62	60.5	1.08	11.05																						
			57	62	62	62	62																									
HORA DE ENSAYO (H:min.)	TIEMPO TRANSCURRIDO (H:min.)	TEMP. AMB. (°C)	PERNO / LONGITUD TOTAL (mm)	SALIENTE / PERNO (mm)	PENETRACIÓN / PERNO (mm)	LECTURA DE CARGA A LA TRACCIÓN (KN)	N/mm	PROM. (N/mm)	RESIST. EN (Mpa)																							
13:20	3:20	16.7	103	20	83	2000	24	22.67	3.30																							
				20	83	2000	24																									
				20	83	1800	22																									
				17	86	2000	23																									
				19	84	1700	20																									
13:40	3:50	16.8	80	15	65	2100	32	30.67	4.34																							
				14	66	2000	30																									
				16	64	1900	30																									
				15	65	2000	31																									
				14	66	2000	30																									



N° DE REPORTE : R.BASF 01-20 "CONTROL INTERNO"

RESISTENCIA : F'c 280kg/cm2. @ 28 Días

TIPO DE MUESTRA : CONCRETO LANZADO VÍA HÚMEDA

OBRA :

ATENCIÓN: ING. YERAD MARTNEZ

CC: ING. PAUL ORTIZ

RESPONSABLE DE ENSAYO : A. TEJADA

PORCENTAJE DE ADITIVO : 10.0%

HORA DE LANZADO : 12:20

FECHA DE PRUEBA : 30 de Junio de 2024

Diseño Shotcrete: F'c 280 kg/cm2

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	Kg.	420
Arena SORANI	Kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	Kg.	2.100
Master Ease 3014	Kg.	1.100
Agua	Lt.	180.0
Fibra sintetica	Kg.	4.0
MasterRoc S.A. 160	Kg.	42.00
R a/c		0.43



Observaciones:

LUGAR DE PRUEBA

ZONA : NV4280

LABOR : TJ 4506

MIXKRET : 1001

ESPESOR : 2"

CUBOS : 4.5

PRESIÓN DE AIRE : 5.0

EQUIPO LANZADO : ROBOT # 37

OPERADOR EQUIPO LANZADO : M. PEREZ

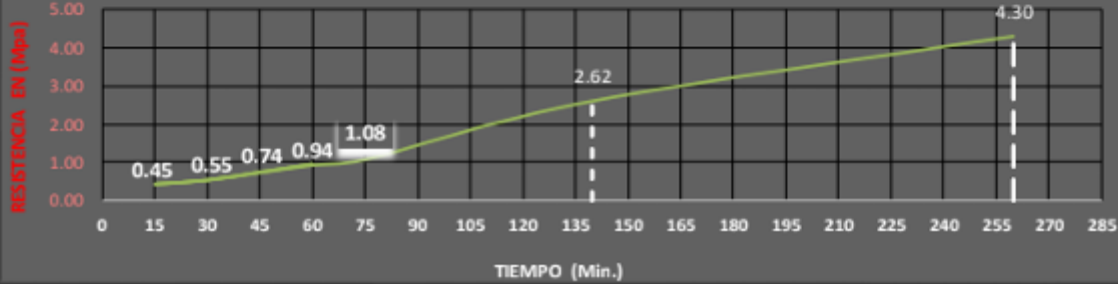
CURVA DE CALIBRACIÓN USADA : II (Agregado de φ 0 a 16 mm)

MÉTODO DE ENSAYO : A

HORA DE LECTURA (hh:mm)	HORA ACUMULADA (hh:mm)	TEMPE. AMBIENTE (°C)	FUERZA A LA PENETRACIÓN (Kp)					PROMEDIO (Kp)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	
			N/mm²	Kg/cm²						
12:35	0:15	16.5	22	27	27	22	27	25.0	0.45	4.57
			22	27	27	27	22			
12:50	0:30	16.5	32	32	22	32	32	30.5	0.55	5.57
			37	32	22	32	32			
13:05	0:45	16.5	37	42	42	42	47	41.5	0.74	7.58
			37	42	42	42	42			
13:20	1:00	16.5	47	52	57	52	57	52.5	0.94	9.59
			47	57	47	57	52			
13:35	1:15	16.6	57	57	62	62	62	60.5	1.08	11.05
			57	62	62	62	62			

HORA DE ENSAYO (H:min.)	TIEMPO TRANSCURRIDO (H:min.)	TEMP. AMB. (°C)	PERNO / LONGITUD TOTAL (mm)	SALIENTE / PERNO (mm)	PENETRACIÓN / PERNO (mm)	LECTURA DE CARGA A LA TRACCIÓN (KN)	N/mm	PROM. (N/mm)	RESIST. EN (Mpa)
14:20	2:20	16.7	103	15	88	1400	16	17.42	2.62
				17	86	1600	19		
				20	83	1400	17		
				18	85	1500	18		
				20	83	1500	18		
16:20	4:20	16.8	80	13	67	2000	30	30.39	4.30
				15	65	1900	29		
				17	63	2100	33		
				16	64	1900	30		
				13	67	2000	30		

CUADRO ESTADISTICO MÉTODO A Y B



TEMPERATURA DE LABOR :14.8 °C TEMPERATURA DEL CONCRETO:15.3 T. DE PANEL: 24.6 °C

N° DE REPORTE : R.BASF 01-20 "CONTROL INTERNO"

RESISTENCIA : F'c 280kg/cm2. @ 28 Dias

TIPO DE MUESTRA : CONCRETO LANZADO VÍA HÚMEDA

OBRA :

ATENCIÓN: ING. YERAD MARTINEZ

CC: ING. PAUL ORTIZ

RESPONSABLE DE ENSAYO : A. TEJADA

PORCENTAJE DE ADITIVO : 10.0%

HORA DE LANZADO : 11:00

FECHA DE PRUEBA : 1de Julio de 2024

Diseño Shotcrete: F'c 280 kg/cm2

Materiales	Unidad	Peso/secos
Cemento	Kg.	420
Arena SORANI	Kg.	1280.00
MasterGlenium 4420	Kg.	2.100
Master Ease 3014	Kg.	1.100
Agua	Lt.	180.0
Fibra sintetica	Kg.	4.0
MasterRoc S.A. 160	Kg.	42.00
R a/c		0.43

METCO Penetration Needle Measuring Instrument



Observaciones:

LUGAR DE PRUEBA

ZONA : NV 4260

LABOR : SN 6424

MIXKRET : 1021

ESPESOR : 2"

CUBOS : 4

PRESIÓN DE AIRE : 4.0

EQUIPO LANZADO : ROBOT # 34

OPERADOR EQUIPO LANZADO : S. OCHOCHOQUE

CURVA DE CALIBRACIÓN USADA : II (Agregado de φ 0 a 16 mm)

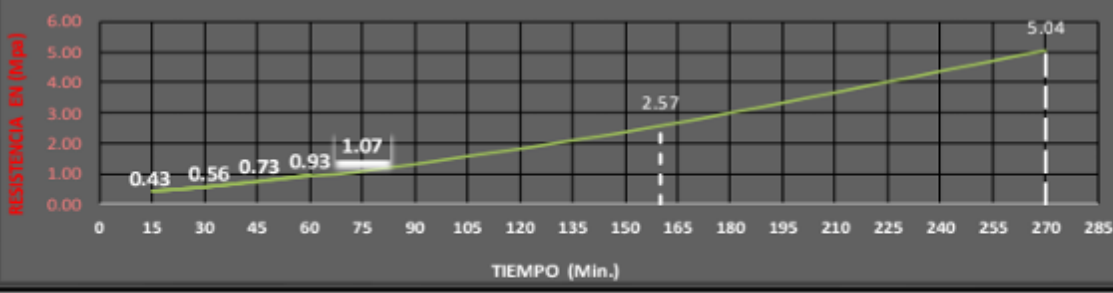
MÉTODO DE ENSAYO : A

HORA DE LECTURA (hh:mm)	HORA ACUMULADA (hh:mm)	TEMPE. AMBIENTE (°C)	FUERZA A LA PENETRACIÓN (Kp)					PROMEDIO (Kp)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	
									N/mm²	Kg/cm²
11:15	0:15	16.5	22	27	22	22	27	24.0	0.43	4.38
11:30	0:30	16.5	32	32	22	32	32	31.0	0.56	5.66
11:45	0:45	16.5	37	42	42	42	42	41.0	0.73	7.49
12:00	1:00	16.5	47	52	57	52	57	52.0	0.93	9.50
12:15	1:15	16.6	57	57	62	62	62	60.0	1.07	10.96

HORA DE ENSAYO (H:min.)	TIEMPO TRANSCURRIDO (H:min.)	TEMP. AMB. (°C)	PERNO / LONGITUD TOTAL (mm)	SALIENTE / PERNO (mm)	PENETRACIÓN / PERNO (mm)	LECTURA DE CARGA A LA TRACCIÓN (KN)	N/mm	PROM. (N/mm)	RESIST. EN (Mpa)
13:30	2:40	18.2	103	12	91	1700	19	17.05	2.57
				16	87	1600	18		
				14	89	1400	16		
				11	92	1500	16		
				10	93	1500	16		
15:30	4:30	16.8	80	18	62	2100	34	36.11	5.04
				20	60	2300	38		
				22	58	2100	36		
				18	62	2200	35		
				20	60	2200	37		

CUADRO ESTADISTICO MÉTODO A Y B

RESISTENCIA EN (Mpa)



TIEMPO (Min.)

TEMPERATURA DE LABOR :19.8 °C TEMPERATURA DEL CONCRETO:15.7 T. DE PANEL: 21.4°C

C. PANEL FOTOGRÁFICO

Verificación de propiedades físicas del agregado fino y del shotcrete.



Nota: Elaboración propia.



Nota: Elaboración propia.

Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete en labor.



Nota: Elaboración propia.



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 16-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 062-2026-FIMGC-D**, a los cinco días del mes de mayo de 2026, siendo las 10:18 a.m., reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Minas**, bajo la presidencia del **MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **Ing. Fortunato DE LA CRUZ PALOMINO**, **Ing. Indalecio QUISPE GUTIERREZ** y **Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONES**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Minas**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

Daniel GUTIERREZ BARZOLA

Quien presentó la tesis denominada:

Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MIR -193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho - 2025

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 16 (dieciseis)

Siendo las 10:51 a.m. del día 05 de mayo del 2026, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

Ing. Fortunato DE LA CRUZ PALOMINO
Miembro

Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONES
Miembro

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



UNSCH

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : GUTIERREZ BARZOLA, Daniel
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de la Tesis : Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho - 2025
- Evaluación de la originalidad : 19% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente la constancia de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 19 de junio de 2026

.....
MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho - 2025

por Daniel GUTIERREZ BARZOLA

Fecha de entrega: 19-jun-2026 09:36p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2986350495

Nombre del archivo: TESIS_DANIEL_GUTIERREZ_BARZOLA.pdf (3.58M)

Total de palabras: 32875

Total de caracteres: 185584

Evaluación de la resistencia temprana del shotcrete con el uso del aditivo MR-193 para la optimización de los costos operativos de la Unidad Minera Inmaculada, Ayacucho - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	cybertesis.uni.edu.pe	4%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unsa.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
3	per.sika.com	1%
	Fuente de Internet	
4	tecnologia-concreto.blogspot.com	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to uni	1%
	Trabajo del estudiante	
6	apirepositorio.unh.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	arg.sika.com	1%
	Fuente de Internet	
8	Submitted to Universidad Continental	1%
	Trabajo del estudiante	
9	repositorio.unamba.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.undac.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
11	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
12	repositorio.uchile.cl	

Fuente de Internet

<1 %

13

riaa-tecno.unca.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

14

repositorio.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

15

repositorio.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

16

repositorio.unap.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

17

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

<1 %

18

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

19

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

20

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

21

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

22

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

24

Submitted to Universidad San Francisco de
Quito

Trabajo del estudiante

<1 %

25

repositorio.upla.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

26

repositorio.unab.cl

Fuente de Internet

<1 %

27	Submitted to Universidad Politécnica del Perú	<1 %
	Trabajo del estudiante	
28	www.theibfr.com	<1 %
	Fuente de Internet	
29	pdffox.com	<1 %
	Fuente de Internet	
30	Submitted to Blackboard	<1 %
	Trabajo del estudiante	
31	Submitted to Universidad Privada del Norte	<1 %
	Trabajo del estudiante	
32	1library.co	<1 %
	Fuente de Internet	
33	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo	<1 %
	Trabajo del estudiante	
34	repositorio.unsaac.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo