

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis de estabilidad del macizo rocoso
para la recuperación de puente
mineralizado unidad minera Yaruchagua,
Glore Peru S. A. C.**

Jorge Luis Taipe Meza

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Julio Fredy Porras Mayta
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 9 de Abril de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

"Análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado unidad minera Yaruchagua Glore Perú S.A.C."

Autores:

1. Jorge Luis Taipe Meza – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): 20 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ASESOR

Ing. Julio Fredy Porras Mayta

DEDICATORIA

A mis padres: Jorge y Celia, personas que me apoyaron en mi formación profesional y fueron el soporte incondicional para poder cumplir mis metas.

Jorge Luis Taipe Meza

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme tener una familia excepcional.

A la facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Continental, por formarme y ofrecerme una inteligencia apropiada para adquirir el ansioso título profesional de Ingeniería de Minas.

A mi asesor, jurados y docentes, que con su capacidad me guiaron para la ejecución de mi tesis.

A mi hermana y abuelos por los consejos brindados para formarme con valores y actitudes.

Jorge Luis Taipe Meza

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema	16
1.1.1 Problema general	17
1.1.2 Problemas específicos.....	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Justificación e importancia.....	18
1.3.1 Justificación	18
1.3.2 Importancia.....	19
1.4 Delimitación.....	20
1.4.1 Delimitación espacial	20
1.4.2 Delimitación temporal	20
1.4.3 Delimitación económica	20
1.5 Hipótesis.....	20
1.5.1 Hipótesis general	20
1.5.2 Hipótesis específicas.....	20
1.5.3 Variables.....	21
1.5.4 Operacionalización de variables	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	25
2.1 Antecedentes del problema	25
2.1.1 Antecedentes nacionales	25
2.2 Bases teóricas	30
2.2.1 Macizo rocoso.....	30
2.2.2 Calidad del macizo	30
2.2.3 Propiedades de las rocas	32
2.2.4 Caracterización del macizo rocoso	34

2.2.5	Discontinuidades de macizos rocosos	35
2.2.6	Estabilidad del macizo	39
2.2.7	Reglamentación de ingeniería del macizo rocoso - D.S. 023	40
2.2.8	Caracterización geomecánica	40
2.3	Definición de términos	45
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		48
3.1	Métodos y alcances de la investigación	48
3.1.1	Método general	48
3.1.2	Tipo de investigación.....	48
3.1.3	Nivel de investigación	48
3.2	Diseño de investigación	48
3.3	Población y muestra	49
3.3.1	Población	49
3.3.2	Muestra	49
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
3.4.1	Técnicas de recolección de datos.....	49
3.4.2	Instrumentos de recolección de datos	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		50
4.1	Generalidades	50
4.2	Geología	51
4.2.1	Geología general.....	51
4.2.2	Geología local.....	52
4.2.3	Tipo de yacimiento	52
4.2.4	Mineralización hipógena:	52
4.3	Caracterización geomecánica.....	53
4.3.1	Clasificación geomecánica de masa rocosa	53
4.3.2	Análisis estereográfico de las discontinuidades.....	57
4.3.3	Propiedades físicas de roca a considerar.....	58
4.3.4	Esfuerzos <i>in situ</i>	60
4.3.5	Análisis de estabilidad	62
4.3.6	Prueba en campo pull test	67
4.4	Discusión de resultados	72
CONCLUSIONES		75
RECOMENDACIONES.....		77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		78
ANEXOS		80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos principales de discontinuidades en macizos rocosos	35
Tabla 2. Parámetros de clasificación geomecánica según Bieniawski	41
Tabla 3. Categoría de clasificación geomecánica	42
Tabla 4. Calidad de RQD.....	43
Tabla 5. Estimación del GSI	43
Tabla 6. Criterio para la clasificación geomecánica	54
Tabla 7. RMR – Bieniawski (1989).....	55
Tabla 8. Mapeo geomecánico con Q de Barton	56
Tabla 9. Resumen de resistencia a la compresión con martillo Schmidt	59
Tabla 10. Resumen del ensayo de laboratorio	59
Tabla 11. Resumen de las pruebas con pull test a los split set.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Túnel en un macizo afectado por una intrusión.....	30
Figura 2. Profundidad de una galería: A. Comportamiento frágil; B. Comportamiento adecuado; C. Comportamiento dúctil	31
Figura 3. Resistencia – módulo de Young	33
Figura 4. Fallas en un talud de roca: A. Falla circular; B. Falla plana; C. Falla en cuña; D. Falla por volcamiento; E. Fallas por flexión; F. Falla por pateo.....	34
Figura 5. Estratificación y esquistosidad en relación con un túnel: A. discontinuidades horizontales; B. discontinuidades verticales; C. discontinuidades oblicuas.....	36
Figura 6. Parámetros de las discontinuidades presentes en una formación rocosa	38
Figura 7. La falla se extiende junto al túnel; B. y D. la falla no intercepta el túnel; C. la falla lo corta de manera transversal; E. y F. el túnel está ubicado en un anticlinal; G. y H. el túnel atraviesa un sinclinal.....	39
Figura 8. Estabilidad de cuñas de roca: A. talud que es cinemáticamente estable. B. talud que presenta inestabilidad cinemática. C. bloques generados en las paredes de un túnel.....	39
Figura 9. Matriz rocosa	41
Figura 10. Mapa de ubicación departamental de la unidad minera Yaruchagua-	51
Figura 11. Zonas de delimitación y recuperación de puente del TJ 921	57
Figura 12. Evaluación estereográfica con DIPS	58
Figura 13. Cuadro de resultados de ensayo de material de relleno	60
Figura 14. Relación del esfuerzo vertical y horizontal (k) para diferentes módulos de deformación	61
Figura 15 Plano con sección crítica TJ 921	63
Figura 16 Resultado de análisis con Unwedge	63
Figura 17. Resultado de análisis con Unwedge con perno split set de 5 y/o 7 pies	64
Figura 18. Condición actual de labor	65
Figura 19. Recuperar puente y dejar 2. 5 m.....	65
Figura 20. Recuperación de puente por realce genera condición de inestabilidad en caja techo.....	66
Figura 21. Se debe rellenar topeado y recuperar el puente de 2.5 m	66
Figura 22. Recuperado el puente de 2.5 m se debe rellenar altura de piso para controlar caja.....	67
Figura 23. Galería 103 carga (t) versus el desplazamiento (mm)	70
Figura 24. Tajeo 119 carga (t) versus el desplazamiento (mm).....	70

Figura 25. Tajeo 946 carga (t) versus el desplazamiento (mm)	71
Figura 26. Galería 981 carga (t) versus el desplazamiento (mm)	71

RESUMEN

La investigación se planteó como objetivo general: efectuar el análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela, unidad minera Yaruchagua Glore Perú S. A. C. 2024. La hipótesis general fue: el análisis de estabilidad del macizo rocoso influirá positivamente en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela de la Unidad Minera Yaruchagua, Glore Perú S. A. C. Al permitir identificar las condiciones geomecánicas críticas y aplicar las técnicas de excavación y sostenimiento más adecuadas, se reducirá los riesgos operacionales y optimizará la eficiencia del proceso de recuperación del mineral. El método general de la investigación fue el científico, tipo aplicada, nivel descriptivo correlacional y diseño no experimental; la población y muestra estuvo conformada por el tajeo TJ 921 Adela de la unidad minera Yaruchagua Glore Perú S. A. C. Producto de la investigación se verificó que el análisis de estabilidad del macizo rocoso influye positivamente en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela de la unidad minera Yaruchagua, Glore Perú S. A. C. Permitir identificar las condiciones geomecánicas con RMR de 51 clasificándolo como una masa regular (III A), resistencia de la roca intacta de 105 MPa, se pudo determinar que la familia de discontinuidades más críticas está agrupada de la siguiente manera: familia (1) 84/221; familia (4) 73/5; familia (5) 43/50, estas son formadores de cunas en corona y lajas en hastiales. El minado se realizará en *breasting*, el cual tiene una influencia directa en la inestabilidad en la caja techo hasta 1.7 m, lo que permite controlar aplicando como sostenimiento los pernos Split set de 7 pies. Finalmente, realizada la recuperación del puente, se efectúa el rellenando por completo hasta altura de piso logrando estabiliza la labor principalmente la caja techo.

Palabras claves: análisis de estabilidad, macizo rocoso, recuperación de puente mineralizado

ABSTRACT

The general objective of the research was: To carry out the stability analysis of the rock mass for the recovery of the mineralized bridge TJ 921 Adela, Yaruchagua mining unit Glore Perú S.A.C. 2024, the general hypothesis consisted of: The stability analysis of the rock mass will positively influence the recovery of the mineralized bridge TJ 921 Adela of the Yaruchagua Mining Unit, Glore Perú S.A.C., by allowing the identification of critical geomechanical conditions and the application of the most appropriate excavation and support techniques, which will reduce operational risks and optimize the efficiency of the mineral recovery process; The general method of the research was scientific, applied type, descriptive correlational level and non-experimental design; The population and sample was made up of: the stope: TJ 921 Adela of the mining unit: Yaruchagua Glore Perú S.A.C. As a result of the investigation it was concluded that: It was verified that the stability analysis of the rock mass has a positive influence on the recovery of the mineralized bridge TJ 921 Adela of the Yaruchagua mining unit, Glore Peru S.A.C., by allowing the identification of the geomechanical conditions with RMR of 51 classifying it as a regular mass (III A), intact rock strength of 105 MPa, the family of most critical discontinuities is grouped as follows: Family (1) 84/221; Family (4) 73/5; Family (5) 43/50, these are cradle formers in crown and slabs in gables. Mining will be carried out in Breasting, which has a direct influence on the instability in the roof box up to 1.7m which allows control by applying 7-foot Split set bolts as support. Finally, once the bridge has been restored, it is completely filled up to floor level, stabilizing the work, mainly in the roof box.

Keywords: stability analysis, rock mass, recovery of mineralized bridge

INTRODUCCIÓN

La presente investigación que lleva por título: «Análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado unidad minera Yaruchagua Glore Perú S. A. C.». Partió de que la recuperación de un puente mineralizado en la minería subterránea plantea un desafío crítico, debido a la complejidad inherente del macizo rocoso que lo sustenta. En el caso del puente mineralizado TJ 921 Adela, de la unidad minera Yaruchagua, operada por Glore Perú S. A. C., se ha identificado la necesidad de realizar un análisis detallado de la estabilidad del macizo rocoso, dada la influencia de factores geológicos y geomecánicos que afectan su integridad estructural.

Uno de los principales problemas que enfrenta la mina es la presencia de discontinuidades, fallas y zonas fracturadas que debilitan el macizo rocoso, lo que incrementa el riesgo de derrumbes o colapsos durante el proceso de recuperación del puente mineralizado. La falta de un análisis adecuado podría poner en peligro tanto la seguridad de los trabajadores como la viabilidad económica de la operación, debido a los posibles sobrecostos asociados con fallos estructurales no previstos y la implementación de medidas correctivas tardías.

Además, la evaluación de la estabilidad es esencial para seleccionar los métodos de sostenimiento y excavación más adecuados, que permitan recuperar de forma eficiente los recursos minerales ubicados en el puente. La complejidad del macizo rocoso y la variabilidad de sus características geomecánicas exigen una investigación rigurosa que permita identificar los principales riesgos y formular estrategias efectivas de recuperación.

La investigación está desarrollada en cinco capítulos cuyos contenidos están descritos de la siguiente manera:

En el capítulo I se da a conocer el planteamiento del estudio abarca la exposición y formulación del problema, incluyendo tanto el problema general como los específicos. Asimismo, se presentan los objetivos generales y específicos. Luego, se detallan la justificación y la delimitación de la investigación. Finalmente, este capítulo concluye con la exposición de la hipótesis general y las específicas, destacando las variables junto con su respectiva operacionalización.

El capítulo II, denominado Marco teórico, presenta los antecedentes de la investigación y las bases teóricas que la sustentan.

El capítulo III, titulado Metodología, detalla los enfoques y alcances del estudio, incluyendo el método general, tipo, nivel, diseño, población y muestra. Además, se destacan las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos.

El capítulo IV, titulado Resultados y discusión, expone los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones formuladas por los investigadores, acompañadas de sus respectivos anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

La recuperación de un puente mineralizado en la minería subterránea plantea un desafío crítico, debido a la complejidad inherente del macizo rocoso que lo sustenta. En el caso del puente mineralizado TJ 921 Adela, de la unidad minera Yaruchagua, operada por Glore Perú S. A. C., se ha identificado la necesidad de realizar un análisis detallado de la estabilidad del macizo rocoso, dada la influencia de factores geológicos y geomecánicos que afectan su integridad estructural.

Uno de los principales problemas que enfrenta la mina es la presencia de discontinuidades, fallas y zonas fracturadas que debilitan el macizo rocoso, lo que incrementa el riesgo de derrumbes o colapsos durante el proceso de recuperación del puente mineralizado. La falta de un análisis adecuado podría poner en peligro tanto la seguridad de los trabajadores como la viabilidad económica de la operación, debido a los posibles sobrecostos asociados con fallos estructurales no previstos y la implementación de medidas correctivas tardías.

Además, la evaluación de la estabilidad es esencial para seleccionar los métodos de sostenimiento y excavación más adecuados, que permitan recuperar de forma eficiente los recursos minerales ubicados en el puente. La complejidad del macizo rocoso y la variabilidad de sus características geomecánicas exigen una investigación rigurosa que permita identificar los principales riesgos y formular estrategias efectivas de recuperación.

En este contexto, surge la pregunta: ¿de qué manera influye el análisis de estabilidad del macizo rocoso en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, en la unidad minera

Yaruchagua, Glore Perú S. A. C. 2024? Responder esta pregunta es crucial para garantizar que las operaciones mineras sean seguras, eficientes y sostenibles a lo largo del tiempo.

La investigación sobre la influencia del análisis de estabilidad del macizo rocoso en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, en la unidad minera Yaruchagua, es de vital importancia debido a diversos factores que impactan tanto la seguridad operativa como la rentabilidad de la actividad minera.

1.1.1 Problema general

¿De qué manera influye el análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela, unidad minera Yaruchagua Glore Perú S. A. C. 2024?

1.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el resultado de la caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela?
- b) ¿En qué medida el analizar las discontinuidades y estructuras geológicas influyen para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela?
- c) ¿Cuál es el plan de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Efectuar el análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela, unidad minera Yaruchagua Glore Perú S.A.C. 2024.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Estimar geomecánicamente el macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela.
- b) Analizar las discontinuidades y estructuras geológicas que influyen para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela.
- c) Establecer el plan de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

➤ Justificación practica

La realización de esta investigación es esencial para resolver un problema operativo concreto en la unidad minera Yaruchagua, relacionada con la recuperación segura y eficiente del puente mineralizado TJ 921 Adela. Un análisis detallado de la estabilidad del macizo rocoso proporcionará información clave para tomar decisiones técnicas y operacionales que optimicen los procesos de excavación y sostenimiento. De esta forma, se podrán prevenir incidentes que pongan en peligro la seguridad del personal y de la infraestructura, garantizando un desarrollo fluido de las actividades mineras.

➤ Justificación social

El análisis de estabilidad del macizo rocoso tiene un impacto directo en la seguridad de los trabajadores de la unidad minera Yaruchagua. La investigación busca reducir los riesgos de accidentes asociados con desprendimientos o colapsos del macizo, creando un entorno laboral más seguro y confiable. Al garantizar la seguridad de las personas involucradas en las operaciones mineras, la empresa cumple con su responsabilidad social, mejora la calidad de vida de los trabajadores y fortalece su relación con las comunidades locales, quienes también dependen del desarrollo sostenido de la minería en la región.

➤ Justificación metodológica

Desde un punto de vista metodológico, esta investigación permitirá aplicar y validar herramientas avanzadas de análisis geomecánico como la modelación numérica y técnicas analíticas para el estudio del comportamiento del macizo rocoso. La investigación facilitará el uso de metodologías de campo, pruebas de laboratorio y simulaciones computacionales que no solo resolverán la problemática específica del puente TJ 921 Adela, sino que también podrán servir como referencia para la resolución de problemas similares en otras minas subterráneas. Esto contribuirá al desarrollo de metodologías más precisas y adaptadas a la realidad de la minería subterránea peruana.

➤ Justificación económica

Los gastos generados con el propósito de la correcta evaluación de la estabilidad del macizo rocoso en la zona del puente mineralizado TJ 921 Adela serán asumidos en su integridad por el sustentante.

1.3.2 Importancia

La importancia de la investigación se sustenta en:

- Seguridad de los trabajadores y equipos: la estabilidad del macizo rocoso en operaciones subterráneas es un factor crucial para la seguridad de los trabajadores. Cualquier colapso o desprendimiento podría causar accidentes graves, comprometiendo la integridad física del personal y de los equipos. Un análisis detallado del macizo rocoso permitirá identificar riesgos potenciales y diseñar estrategias de sostenimiento que minimicen los peligros, garantizando un entorno laboral seguro y cumpliendo con las normativas de seguridad y salud ocupacional.
- Optimización de costos operativos: la recuperación eficiente del puente mineralizado está directamente relacionada con el análisis de la estabilidad del macizo rocoso. Un análisis inadecuado o superficial puede resultar en sobre costos debido a fallos inesperados, tiempos de inactividad por correcciones de emergencia, y la necesidad de implementar sostenimientos adicionales no planificados. Al desarrollar un análisis geomecánico detallado, la mina puede planificar de manera más precisa las operaciones de excavación y sostenimiento, optimizando los recursos y reduciendo el riesgo de sobre costos.
- Viabilidad económica del proyecto: la recuperación de puentes mineralizados es una parte fundamental de la extracción de recursos en minas subterráneas. Un proyecto de recuperación exitoso depende de la capacidad de evaluar y controlar las condiciones del macizo rocoso para extraer el mineral de manera segura y eficiente. La estabilidad geotécnica influye en la selección de métodos de excavación, sostenimiento y refuerzo, todos ellos impactando en los costos operacionales y la rentabilidad final del proyecto. Un análisis preciso de la estabilidad aumenta las probabilidades de éxito económico de la operación.
- Sostenibilidad y continuidad de las operaciones mineras: el análisis de estabilidad es esencial para asegurar la continuidad a largo plazo de las operaciones mineras. La planificación adecuada de la recuperación de puentes mineralizados garantiza que se preserven las condiciones del entorno subterráneo y se minimicen los impactos adversos en las operaciones futuras. Al realizar una investigación rigurosa, se pueden identificar estrategias que mantengan la estabilidad del macizo rocoso a largo plazo, permitiendo que la mina continúe sus actividades sin interrupciones significativas.
- Contribución al conocimiento científico y técnico: esta investigación no solo tiene un impacto directo en la unidad minera Yaruchagua, sino que también contribuye al desarrollo

de metodologías y mejores prácticas aplicables en otras operaciones mineras. El análisis detallado de las condiciones geomecánicas del puente mineralizado y su influencia en los procesos de recuperación puede proporcionar valiosa información para futuras investigaciones y aplicaciones en minas con características geológicas similares.

1.4 Delimitación

1.4.1 Delimitación espacial

La investigación se llevó a cabo en la unidad minera Yaruchagua ubicada en:

- Paraje : Yaruchagua
- Comunidad : Pampania
- Distrito : Santa Ana de Tusi
- Provincia : Daniel Alcides Carrión
- Departamento: Pasco

1.4.2 Delimitación temporal

La investigación se desarrolló entre los meses de noviembre del 2024 a febrero de 2025.

1.4.3 Delimitación económica

Los gastos que se efectuaron en la investigación fueron cubiertos por el sustentante.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

El análisis de estabilidad del macizo rocoso influirá positivamente en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela de la unidad minera Yaruchagua, Glore Perú S. A. C., al permitir identificar las condiciones geomecánicas críticas y aplicar las técnicas de excavación y sostenimiento más adecuadas, se reducirá los riesgos operacionales y optimizará la eficiencia del proceso de recuperación del mineral.

1.5.2 Hipótesis específicas

- a) La caracterización geomecánica del macizo rocoso permitirá identificar sus propiedades físicas y mecánicas clave, lo que facilitará la selección de los métodos de excavación y sostenimiento más apropiados para la recuperación eficiente y segura del puente mineralizado TJ 921 Adela.
- b) El análisis detallado de las discontinuidades y estructuras geológicas que influyen en el macizo rocoso permitirá identificar zonas de mayor inestabilidad, lo que contribuirá a la

implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.

- c) El establecimiento de un plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, basado en el análisis de estabilidad del macizo rocoso y sus características geomecánicas, permitirá optimizar los recursos y reducir los riesgos operacionales, garantizando la viabilidad técnica y económica.

1.5.3 Variables

a) Variable independiente

➤ Análisis de estabilidad del macizo rocoso (X)

• Definición conceptual

Se refiere al proceso de evaluación y comprensión de las condiciones geomecánicas de un macizo rocoso con el objetivo de determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales. Este análisis implica la identificación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo, así como el estudio de las discontinuidades, estructuras geológicas y el impacto de factores externos (como la presión del agua o el clima) que pueden afectar su estabilidad. Un análisis adecuado es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras, especialmente en la recuperación de recursos minerales.

• Definición operacional

El análisis de estabilidad del macizo rocoso se operacionaliza a través de una serie de pasos metodológicos que incluyen:

- Recolección de datos geológicos y geomecánicos: recopilación de información sobre las características del macizo rocoso, incluyendo su composición mineral, propiedades físicas (densidad, porosidad, etc.) y mecánicas (resistencia, deformabilidad, etc.)
- Identificación de discontinuidades: estudio de las fracturas, fallas y otras discontinuidades presentes en el macizo, que pueden afectar su estabilidad.
- Modelación numérica: utilización de software especializado para simular el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones de carga y para evaluar la estabilidad en escenarios de operación específicos.
- Evaluación de riesgos: análisis de los riesgos asociados a posibles fallos o colapsos del macizo rocoso durante las actividades de recuperación mineral, considerando factores como la presión de poros, carga de explotación, y condiciones ambientales.

- Formulación de estrategias de sostenimiento: Desarrollo de recomendaciones y planes para la implementación de métodos de sostenimiento adecuados que mitiguen los riesgos identificados.

- **Dimensiones:**

- Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso.
- Evaluación de las discontinuidades y estructuras geológicas.
- Plan de recuperación del puente mineralizado. plan de recuperación del puente mineralizado.

b) Variable dependiente

➤ **Puente mineralizado (Y)**

- **Definición conceptual**

Un puente mineralizado es una zona específica dentro de un yacimiento mineral que presenta una concentración significativa de recursos minerales. Este término se utiliza comúnmente en la minería subterránea para describir áreas donde el mineral se encuentra parcialmente rodeado por rocas no mineralizadas, lo que forma una especie de "puente" entre diferentes cuerpos de mineral o entre el mineral y el entorno geológico circundante. La identificación y caracterización de un puente mineralizado son cruciales para planificar su recuperación, ya que las condiciones geológicas y geomecánicas de esta área pueden presentar desafíos únicos durante el proceso de extracción.

- **Definición operacional**

El puente mineralizado se refiere a una sección específica de un yacimiento mineral donde hay una concentración notable de minerales valiosos, que está parcialmente rodeada por rocas no mineralizadas. Este término se utiliza comúnmente en la minería subterránea para describir áreas que actúan como un nexo o conexión entre diferentes cuerpos mineralizados o entre el mineral y el entorno geológico y acciones que incluyen:

- Identificación geológica: localización del puente mineralizado mediante estudios geológicos, geofísicos y de muestreo que permiten determinar su presencia y características.
- Caracterización mineral: análisis de la composición del mineral presente en el puente, incluyendo la identificación de los metales o minerales de interés y su concentración.
- Evaluación de las condiciones geomecánicas: estudio de las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso que rodea al puente mineralizado, para determinar su estabilidad y los métodos de extracción más adecuados.

- Planificación de la recuperación: desarrollo de un plan que contemple los métodos y técnicas para la extracción del mineral del puente, asegurando que se minimicen los riesgos operacionales y se optimicen los recursos.
- Monitoreo y control: implementación de un sistema de monitoreo para evaluar la estabilidad del puente durante su recuperación, garantizando la seguridad de las operaciones mineras.

- **Dimensiones**

- Evaluación geológica
- Diseño del plan de minería
- Implementación de métodos de extracción
- Monitoreo y control de estabilidad
- Transporte y procesamiento

1.5.4 Operacionalización de variables

Variable (s)	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente	Se refiere al proceso de evaluación y comprensión de las condiciones geomecánicas de un macizo rocoso, con el objetivo de determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales. Este análisis implica la identificación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo, así como el estudio de las discontinuidades, estructuras geológicas y el impacto de factores externos (como la presión del agua o el clima) que pueden afectar su estabilidad. Un análisis adecuado es	El análisis de estabilidad del macizo rocoso es un proceso técnico que evalúa la capacidad de un macizo rocoso para soportar cargas y fuerzas sin fallar o colapsar. Este análisis implica el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, así como la identificación de factores geológicos, estructurales y ambientales que pueden afectar su comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso. • Evaluación de las discontinuidades y estructuras geológicas. • Plan de recuperación del puente mineralizado, plan de recuperación del puente mineralizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • (RMR o Q de Barton) • Densidad de fracturamiento <p>Tasa de recuperación del mineral (%)</p>

	<p>fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras, especialmente en la recuperación de recursos minerales.</p>			
Dependiente	<p>Se refiere al proceso de evaluación y comprensión de las condiciones geomecánicas de un macizo rocoso, con el objetivo de determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales. Este análisis implica la identificación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo, así como el estudio de las discontinuidades, estructuras geológicas y el impacto de factores externos (como la presión del agua o el clima) que pueden afectar su estabilidad. Un análisis adecuado es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras, especialmente en la recuperación de recursos minerales</p>	<p>Puente mineralizado se refiere a una sección específica de un yacimiento mineral donde hay una concentración notable de minerales valiosos, que está parcialmente rodeada por rocas no mineralizadas. Este término se utiliza comúnmente en la minería subterránea para describir áreas que actúan como un nexo o conexión entre diferentes cuerpos mineralizados o entre el mineral y el entorno geológico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación geológica. • Diseño del plan de minería. • Implementación de métodos de extracción. • Monitoreo y control de estabilidad. • Transporte y procesamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de precisión en la estimación de reservas minerales • Tasa de cumplimiento del cronograma de producción (%) • Eficiencia del método de extracción (%) • Factor de seguridad (FS) • Costo por tonelada transportada y procesada (\$/t)

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedentes nacionales

- a) Rodas (1) en su tesis titulada: «Recuperación de puentes mineralizados para incrementar la producción en unidad minera Parcoy de Consorcio Minero Horizonte S.A.» tuvo como objetivo general determinar el método de explotación de los puentes para incrementar la producción en la unidad Parcoy (1 p. 13).

Los objetivos específicos fueron:

- Determinar los esfuerzos de la roca, mineral y relleno, así como del sostenimiento de cuadros en la zona de puente mineralizado sujeto a explotación (1 p. 14).
- Estimar el costo de producción y la utilidad de los puentes recuperados en la Unidad Parcoy (1 p. 14).

Producto de su investigación formulo las siguientes conclusiones:

- La investigación llevada a cabo en la mina Parcoy del Consorcio Minero Horizonte revela la presencia de un puente mineralizado con 27.6639 toneladas métricas disponibles para explotación. Este proceso, denominado recuperación, busca extraer el mineral, representando un aumento en la producción de la mina. La ley de cabeza del mineral es de 1.87 onzas troy por tonelada, y la estructura fue explotada mediante el método de corte y relleno ascendente (1 p. 57).
- Los estudios geomecánicos realizados en el área mineralizada, utilizando el sistema de evaluación RMR, clasifican el macizo rocoso en categorías de macizos regulares – A, regulares – B, y muy débiles (rellenos) en varios dominios estructurales, con un valor de 55.

El momento flector de la madera es de 428 KNm y la resistencia a la compresión de la roca, el mineral y el relleno es de 84, 81 y 5 MPa, respectivamente (1 p. 57).

- El valor del mineral de oro en el puente mineralizado alcanza los 84,234.22 \$/t, con un costo de 218.24 \$/t, lo que genera una utilidad de 77,135.44 dólares (1 p. 57).
- b) Cruz y Abanto (2) presentaron una investigación titulada: «Análisis comparativo de los parámetros de entrada q de Barton y RMR de Bieniawski para identificar la dilución de mineral en el macizo rocoso de una empresa minera de Cajamarca 2021». El objetivo general fue establecer un análisis comparativo de los parámetros de entrada Q de Barton y RMR de Bieniawski para identificar la dilución de mineral en el macizo rocoso de una empresa minera de Cajamarca en el año 2021 (2 p. 36).

Los objetivos específicos fueron:

- Caracterizar el macizo rocoso presente en el nivel 3 haciendo uso de la clasificación RMR Bieniawski y Q de Barton en base a los parámetros geomecánicos obtenidos de los sondajes (ALS-01, ALS-02, ALS-03 y ALS04) (2 p. 36).
- Identificar las leyes de oro, plata y porcentajes de dilución que presentó el nivel 3 durante el primer trimestre del año 2021 (2 p. 36).
- Definir los tipos de roca presente en el nivel 3 con los métodos de RMR de Bieniawski y Q de Barton comparando ambos resultados con las leyes de oro y plata (2 p. 36).

Producto de su investigación formuló las siguientes conclusiones:

- Se realizó un análisis comparativo de los parámetros Q de Barton y RMR de Bieniawski en el macizo rocoso del nivel 3, identificando leyes de oro y plata con valores de 51.33 gr/t Au, 20.5 gr/t Au, 20.7 gr/t Ag y 11.73 gr/t Ag. Los porcentajes de dilución medidos superaron en un 6% a los programados (2 p. 58).
- El macizo rocoso del nivel 3 fue caracterizado utilizando las clasificaciones RMR de Bieniawski y Q de Barton, basadas en los parámetros geomecánicos obtenidos de los sondajes (ALS-01, ALS-02, ALS-03 y ALS-04). Se encontró que la calidad de la roca varía entre regular a buena (RMR) y muy buena a extremadamente buena (Q de Barton) (2 p. 58).
- Durante el primer trimestre de 2021, se identificaron las leyes de oro, plata y los porcentajes de dilución en el nivel 3, destacando los sondajes ALS-03 y ALS-04, que registraron las leyes más altas: 20.5 gr/t Au - 11.73 gr/t Ag y 51.33 gr/t Au - 20.7 gr/t Ag, respectivamente. La dilución de mineral excedió en hasta un 6% los límites programados, siendo más pronunciada en marzo (2 p. 58).

- Se compararon los resultados de las leyes y la calidad de la roca, destacándose que los sondajes presentaron una calidad de roca Buena (RMR) y Extremadamente Buena (Q de Barton) (2 p. 58).
 - Se decidió ajustar el dimensionamiento de las secciones para continuar con el proceso de explotación, ya que el principal problema radica en la deficiente caracterización del macizo rocoso. Actualmente, se está considerando la presencia de roca de calidad mala a regular, y con base en esa información se ha hecho un mal dimensionamiento de las secciones, lo que ha contribuido al incremento de los porcentajes de dilución (2 p. 59).
 - Se sugiere profundizar la investigación, comparando los resultados con el sistema de clasificación del macizo rocoso GSI, e incorporar el análisis de todos los datos geomecánicos para identificar las posibles causas que estén generando el aumento en la dilución (ELOS) (2 p. 59).
- c) Rodríguez (3) presentó un estudio titulado: «Metodología para recuperar puentes y pilares mediante muros de concreto en el tajo 9910-4, nivel 2995, contrata Divino Jesús, Pataz». El objetivo general fue aplicar la metodología de muros de concreto para recuperar puentes y pilares el TJ 9910-4, Nv.2995 en contrata Divino Jesús, Pataz 2022 (3 p. 10).

Sus objetivos específicos fueron:

- Evaluar la operación de la etapa de recuperación de puentes y pilares con muros de concreto” (3 p. 10).
- Determinar las propiedades mecánicas del concreto (3 p. 10).
- Verificar las condiciones geomecánicas y de estabilidad del macizo rocoso al aplicar la metodología (3 p. 10).

Producto de su investigación formulo las siguientes conclusiones:

- Se evaluó la operación de recuperación de puentes y pilares con muros de concreto en el TJ 9910-4 Nv. 2995, donde inicialmente había 21 pilares naturales. Para construir los pilares artificiales, se identificaron 9 aberturas (V9), con un área total de 1042.99 m², una altura promedio de 5.52 metros y un volumen de 3760.08 m³. La recuperación de pilares se realizó en 7 accesos, destacando el acceso 7 por permitir la recuperación de 11 pilares (3 p. 35).
- Se determinaron las propiedades mecánicas del concreto mediante ensayos de compresión, concluyendo que se necesita una resistencia de 175 kg/cm² para un "Wood pack" de 1x1 metro y 1.5 metros de altura, capaz de soportar una presión de 180 ton/m² (3 p. 35).
- Además, se verificaron las condiciones geomecánicas y la estabilidad del macizo rocoso al aplicar la metodología, destacando la necesidad de un modelamiento geomecánico y un

análisis de estabilidad. Inicialmente, el factor de seguridad fue de 0.95 con un radio plástico máximo de 4.12 metros. A medida que se recuperaban los pilares, el factor de seguridad fluctuó entre 0.95 y 1.26, y el radio plástico aumentó a 10 metros, redistribuyéndose los esfuerzos entre los pilares naturales y artificiales (3 p. 35).

- Finalmente, se implementó con éxito la metodología de muros de concreto para recuperar puentes y pilares en el TJ 9910-4 Nv. 2995, de la contrata Divino Jesús, Pataz, en 2022, evaluando la operación, las propiedades mecánicas del concreto y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso (3 p. 35).

d) Porras (4) presentó un estudio titulado: «Evaluación geomecánica para la recuperación de puentes con fines de seguridad». El objetivo de la investigación fue establecer la influencia de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para la recuperación de puentes mineralizados con fines economía y seguridad en la galería Juanita nivel 0 - tajeo 425 mina artesanal Mercenario I, Acopalca –Paucartambo – Pasco 2018 (4 p. 15).

Los objetivos específicos fueron:

- Sugerir el tipo de sostenimiento a implementar para la recuperación de puentes mineralizados con fines de economía y seguridad en la galería Juanita nivel 0 - tajeo 425” (4 p. 15).
- Estimar el costo del sostenimiento a implementar para la recuperación de puentes mineralizados con fines economía y seguridad en la galería Juanita nivel 0 - tajeo 425 (4 p. 15).

Producto de su investigación formulo las siguientes conclusiones:

- Se concluye que los resultados de la caracterización geomecánica, según la clasificación RMR de Bieniawski, arrojan una puntuación de 58, lo que corresponde a una clase III y describe una roca de calidad regular. El tipo de sostenimiento recomendado incluye la instalación de pernos sistemáticos, espaciados entre 1.5 y 2 metros (4 p. 105).El sostenimiento a implementar consiste en pernos Split set y puntales de seguridad, cada uno con características específicas (4 p. 105).
- Los costos del sistema de sostenimiento se estiman en 11.94 dólares por unidad para los pernos Split set, y 14.57 dólares por unidad para los puntales de seguridad (4 p. 105).

e) Ccorahua y Rojas (5) presentaron un estudio titulado: «Geomecánica aplicada a la recuperación de pilares de mineral de la cámara 4, nivel 3075 en la unidad de producción

chilcas bajo de la empresa minera Marsa, Parcoy la Libertad-2021». El objetivo general fue demostrar que con la aplicación de la geomecánica será conocida la calidad de los macizos rocosos que es determinante para la recuperación de los pilares de mineral dejados en la cámara 4, nivel 3075 en la unidad de producción chilcas bajo de la Empresa Minera Marsa, Parcoy (5 p. 7).

Los objetivos específicos fueron:

- Determinar las características geomecánicas del pilar para extraer los pilares en la cámara 4, nivel 3075 de la Unidad Minera Chilcas Bajo, Parcoy (5 p. 7).
- Determinar el tiempo de autoaporte de las cajas una vez extraído el pilar, en la cámara 4, nivel 3075 de la Unidad Minera Chilcas Bajo, Parcoy (5 p. 7).
- Determinar el tipo de sostenimiento a emplear para la recuperación de los pilares de mineral dejados en la cámara 4, nivel 3075 en la unidad de producción chilcas bajo de la Empresa Minera Marsa, Parcoy (5 p. 7).
- Determinar la rentabilidad de la recuperación de pilares de mineral dejados en la cámara 4, nivel 3075 en la unidad de producción chilcas bajo de la Empresa Minera Marsa, Parcoy (5 p. 7).

Producto de su investigación formulo las siguientes conclusiones:

- Se determinó el tiempo de autoaporte mediante el siguiente análisis: de acuerdo con los ensayos realizados, la calidad de la roca varía entre regular A y regular B, lo que indica un tiempo de autoaporte de entre 6 y 48 horas. Por razones de seguridad, se optó por considerar el tiempo mínimo de 6 horas (5 p. 79).
- Se definió que el tipo de sostenimiento para la recuperación de pilares consistirá en el uso de puntales con platos Jackpot, que funcionan como pilares artificiales temporales hasta que se complete el relleno de las labores (5 p. 79).
- También se evaluó la rentabilidad de la recuperación de los pilares de mineral dejados en la cámara 4, nivel 3075, de la unidad de producción Chilcas Bajo en la Empresa Minera Marsa, Parcoy. Los costos de producción fueron de $230.93 \$/t * 56.71 t = 13,093.73$ dólares, los costos de sostenimiento ascendieron a 513.39 dólares ($51.339 \$/\text{puntal Jackpot} * 10$), los costos administrativos a 18,891.98 dólares, y la utilidad total fue de 156,420.70 dólares (5 p. 79).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Macizo rocoso

Las rocas pueden ser duras o blandas, y las fallas en los macizos pueden ocurrir en áreas de debilidad o discontinuidad estructural. Las rocas blandas suelen fallar tanto en el interior de la masa rocosa como a través de sus defectos estructurales (6).

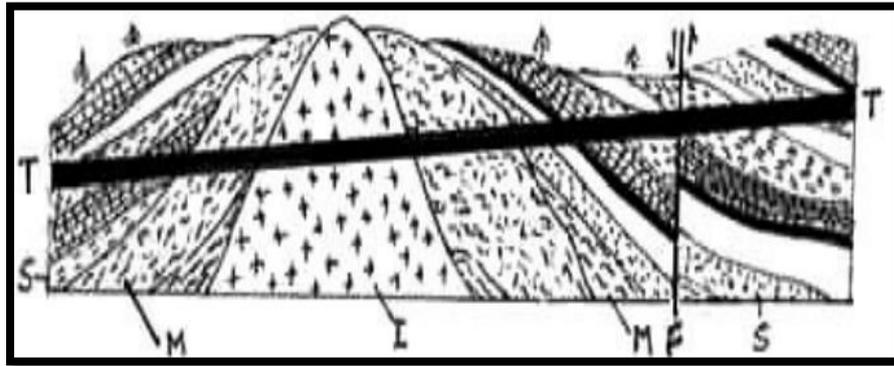


Figura 1. Túnel en un macizo afectado por una intrusión

Nota: Inicialmente, el macizo era sedimentario y actualmente muestra una aureola de metamorfismo. (T para túnel, F para falla, I para roca ígnea, M para roca metamórfica y S para roca sedimentaria)

Las capas sedimentarias están elevadas hacia la intrusión ígnea. El metamorfismo afecta a las rocas sedimentarias debido al magma ascendente. El contacto entre las rocas metamórficas y la intrusión presenta fallas. También hay una falla tectónica presente. Un túnel que atraviese este macizo encontrará diferentes comportamientos en las rocas: las rocas metamórficas mostrarán un comportamiento plástico, mientras que en las dos zonas de falla será elástico. Las rocas ígneas y metamórficas serán duras, en contraste con las sedimentarias, que serán blandas. Además, habrá discontinuidades de retracción en las rocas ígneas y de estratificación en las sedimentarias, lo que resulta en comportamientos que varían considerablemente (6).

2.2.2 Calidad del macizo

Se clasifica un suelo o roca como blando o duro en función de su resistencia a la compresión, que se encuentra dentro de los siguientes rangos (6)

- Suelo blando menos de 4 Kg/cm²
- Suelo duro entre 4 - 10 Kg/cm²
- Roca blanda de 10 a 375 Kg/cm²
- Roca intermedia de 375 a 700 Kg/cm²
- Roca dura más de 700 Kg/cm²
- El concreto corriente es de sólo 210 Kg/cm²

Las rocas blandas son aquellas que pueden fallar en material intacto bajo los niveles de esfuerzo presentes en el área de influencia de una excavación, sin que tenga sentido asignar un valor numérico a su resistencia. Esto es especialmente cierto si se considera que los macizos de roca más duras también pueden fallar en excavaciones profundas. El comportamiento de una galería puede ser dúctil, adecuado o frágil, como se ilustra en la figura, dependiendo de profundidades de 100, 200 y 300 metros, respectivamente. Para evaluar estos niveles de esfuerzo, se puede decir que 1 kg/cm² equivale a 10 TT/m², que es el esfuerzo generado por una columna de agua de 10 metros (6).

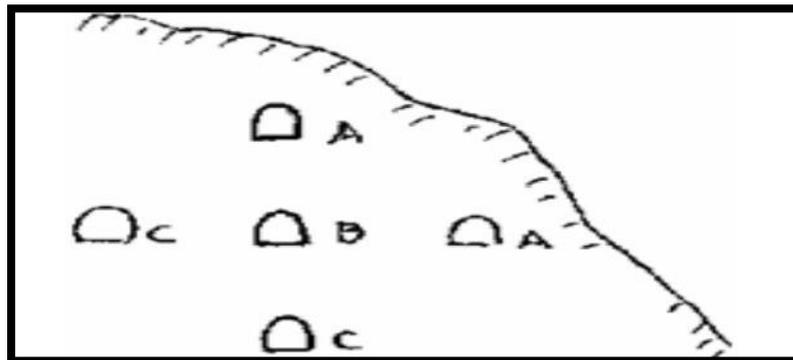


Figura 2. Profundidad de una galería: A. Comportamiento frágil; B. Comportamiento adecuado; C. Comportamiento dúctil

En A, hay una relajación de esfuerzos que puede hacer que el bloque superior caiga.

En B, el confinamiento es adecuado y la región se considera óptima.

En C, existe el riesgo de implosión si el túnel se cierra y la roca se comporta de manera plástica.

Si la densidad de la roca es de 2,5 ton/m³, la carga de roca a 300 metros de profundidad ($P_z = \gamma H$) será de 75 kg/cm², y a 600 metros será de 150 kg/cm² (6).

Experimentalmente, se ha determinado que, para las excavaciones, el factor de seguridad es del orden de 5. Esto implica que la presión litostática P_z dividida por el esfuerzo de ruptura SC debe ser mayor a 0,2, que es el inverso de 5 y representa el límite por debajo del cual se supone que las rocas fallarían. En los casos mencionados, $P_z / 0,2 > SC$ da los siguientes valores:

- Para $H = 300$ m de la relación anterior $75 / 0,2 > 375$ kg/cm²
- Para $H = 600$ m de la relación anterior $150 / 0,2 > 750$ kg/cm²

2.2.3 Propiedades de las rocas

➤ **Rocas ígneas**

Son altamente resistentes, isotrópicas, rígidas, frágiles, densas y presentan una textura entrelazada. Sin embargo, su desventaja radica en la presencia de materiales alterables y en el diaclasamiento.

➤ **Rocas ígneas plutónicas**

Contienen minerales resistentes, entrelazados y presentan fallas en escalonado de los minerales debido a sus diferencias.

➤ **Rocas ígneas volcánicas**

Presentan una heterogeneidad mineral; las fallas en los poros afectan la roca y la porosidad confiere plasticidad a la masa, aunque en el caso de las rocas masivas, esta porosidad es mínima.

➤ **Rocas sedimentarias**

Presentan una resistencia media a baja, son ortotrópicas, poco rígidas, dúctiles, porosas y tienen una textura cementada-laminada. Su principal desventaja es la ortotropía, que complica los cálculos de estabilidad y el comportamiento del macizo. La resistencia en estas rocas depende del grado de cementación y de su densidad, aumentando cuando los granos son finos. La presencia de disolución en la masa genera porosidad, y los planos de estratificación constituyen áreas de debilidad.

➤ **Rocas metamórficas**

Se distinguen por su resistencia media a alta, ortotropía, tenacidad, textura entrelazada y baja porosidad. Presentan rigidez en la dirección paralela y plasticidad en la dirección perpendicular a los planos de clivaje. Su ortotropía complica los cálculos. Estas rocas son elásticas debido a la cristalización de la masa y densas por el empaquetamiento. La presencia de minerales laminados indica debilidad, y la esquistosidad señala áreas vulnerables. Los gneises son similares a los granitos, aunque su bandeamiento les confiere debilidad.

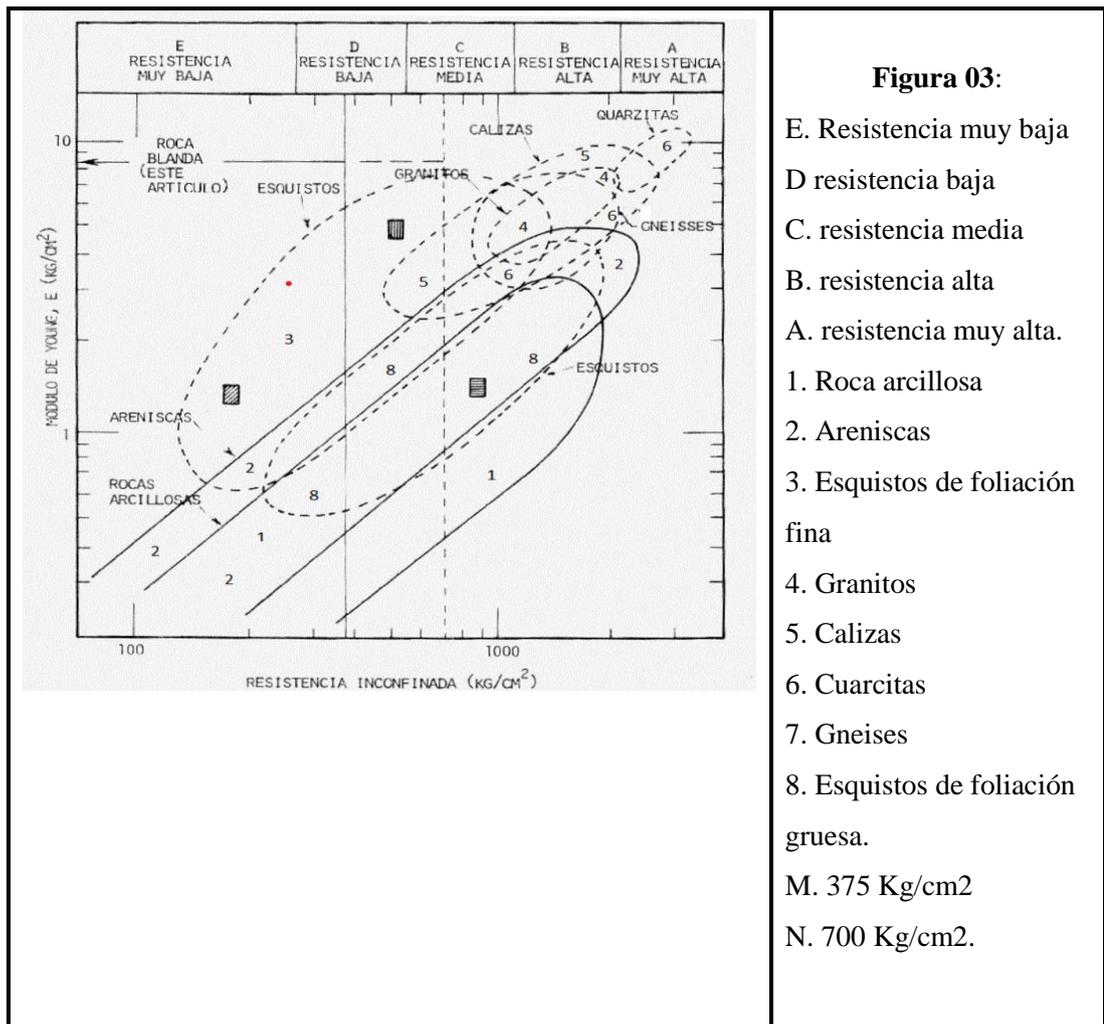


Figura 3. Resistencia – módulo de Young

➤ **Macizos en roca blanda**

Los macizos de roca blanda están formados principalmente por materiales sedimentarios de grano fino, como arcillolitas, lodolitas, limolitas, tobas y margas, así como areniscas o conglomerados con mala cementación, o por rocas metamórficas con una orientación esquistosa desfavorable (Filitas, Esquistos). Su comportamiento geomecánico está determinado tanto por la roca intacta como por las fracturas, diaclasas y fallas presentes. (6)

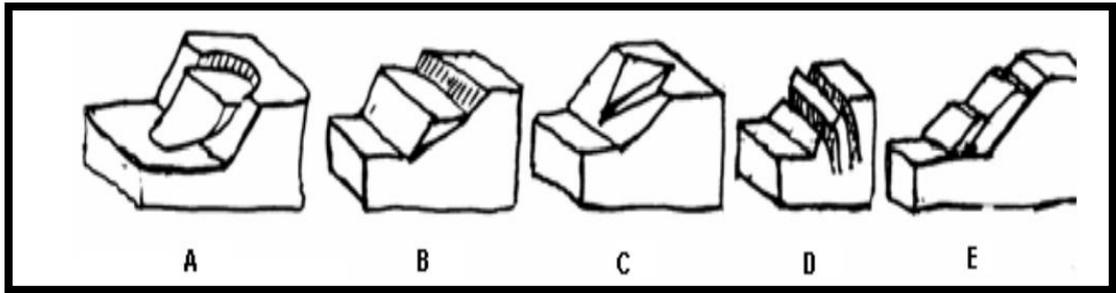


Figura 4. Fallas en un talud de roca: A. Falla circular; B. Falla plana; C. Falla en cuña; D. Falla por volcamiento; E. Fallas por flexión; F. Falla por pateo. Tomada de Hoek y Bray, en Ingeniería de taludes rocosos.

Los macizos de roca meteorizada también pueden clasificarse como masa de roca blanda, cuyas discontinuidades están rellenas de materiales similares al suelo. Estos macizos frecuentemente presentan una transición hacia suelos residuales, donde los saprolitos exhiben estructuras relictas, heredadas de la roca intacta, que actúan como zonas de falla (6).

2.2.4 Caracterización del macizo rocoso

Esta tarea implica la observación, medición y realización de ensayos para obtener parámetros cuantitativos que son útiles para el diseño ingenieril. Este proceso se lleva a cabo en todas las etapas del desarrollo del proyecto, desde el diseño hasta la construcción y operación. Dependiendo de la fase de diseño, es necesario establecer un nivel mínimo de caracterización. El primer nivel se basa en observaciones geológicas, el segundo requiere prospecciones geofísicas, y el nivel final incluye perforaciones exploratorias, mediciones y ensayos geotécnicos (6).

Los parámetros geotécnicos esenciales incluyen la resistencia al corte, la deformabilidad, la permeabilidad y el estado original de esfuerzos, aplicables tanto a macizos de rocas duras como blandas. En el caso de las rocas blandas, la durabilidad y el potencial de expansión y fluencia son propiedades prioritarias.

En el caso de las cimentaciones, los principales problemas para una estructura en roca blanda incluyen asentamientos diferenciales, rebote, fallas en el contacto entre la estructura y la roca, altas presiones de poros, fugas excesivas y, en raras ocasiones, fallas debido a la capacidad portante del macizo. En los taludes, la altura influye en el tipo de caracterización geotécnica, así como la resistencia de la roca intacta y la geometría de las discontinuidades. Aunque la resistencia al corte es fundamental, la deformabilidad también puede ser relevante debido a la inducción de fracturas de tensión en la corona, donde el agua infiltrada provoca situaciones de inestabilidad que antes no existían (6)..

2.2.5 Discontinuidades de macizos rocosos

Las discontinuidades presentes en la roca influyen en la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Es crucial evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de estas discontinuidades, ya que determinan la estructura del macizo rocoso. Además de su génesis, su impacto en el comportamiento del macizo requiere analizar la formación de los rellenos, la cantidad de agua, las cicatrices y revestimientos en las paredes por materiales solubles, así como la abertura, rugosidad, persistencia de las discontinuidades y la cantidad de familias presentes (6).

Tabla 1. Tipos principales de discontinuidades en macizos rocosos

Origen	Roca	Clase	Mecanismo
Genético	Ígneas	Estructura de flujo	Contactos entre coladas de lavas sucesivas
		Estructura de retracción	Grietas de retracción por enfriamiento
	Metamórfas	Foliación	Por gradientes térmicos, de presión y anatexia
	Sedimento	Estratificación	Contactos entre eventos de deposición
Físico- Químico	Todas	Termo fracturas	Ciclo de calentamiento-enfriamiento o humedecimiento-secado
		Halifracturas	Expansión de sales y arcillas en fracturas
		Gelifracturas	Ciclo de congelamiento y fusión de agua
Gravedad	Todas	Relajación	Pérdida de presión de sepultura y esfuerzos de tracción
		Corte	Concentración de esfuerzos horizontales en valles
Tectónico	Todas	Estructuras de placa	Bordes constructivos, pasivos y destructivos
		Fallas	Rupturas con deslizamientos por esfuerzos de compresión, tracción y corte
		Diaclasas	Ruptura por esfuerzos tectónicos, pero sin desplazamiento de bloques
		Fracturas de pliegues	Radiales en la zona de tracción y de corte en la parte interna de la chamela
Biológico	Todas	Acción de las raíces	Penetración y crecimiento de las raíces de los árboles

Las discontinuidades pueden ser:

➤ **Genéticas o primarias**

Estas discontinuidades están relacionadas con estructuras de flujo y fenómenos de retracción térmica en las rocas ígneas, así como con la foliación en ciertas rocas metamórficas y la estratificación en las sedimentarias. Se forman al mismo tiempo que la roca (6).

➤ **Termoquímicas**

Estas discontinuidades, de naturaleza secundaria, pueden formarse después de que la roca ha sido creada, como resultado de factores externos. Esto incluye la termo fracturación debido a gradientes térmicos, la gelifracturación causada por el agua y el hielo, la halifracturación por sales, y la argilofracturación provocada por las arcillas (6).

➤ **Gravitacionales y tectónicas**

Estas son discontinuidades secundarias vinculadas a esfuerzos gravitatorios como las grietas de tracción o a esfuerzos tectónicos, que abarcan diaclasas, fallas y estructuras de placas tectónicas (6).

➤ **Sistema de diaclasas**

Los métodos para recolectar información sobre discontinuidades son imprecisos, siendo la brújula, la elaboración de planos o mapas y la topografía los más utilizados.

La descripción de perforaciones resulta útil cuando se tiene control sobre la verticalidad y la orientación, siempre que vaya acompañada de una adecuada descripción de las muestras. Una familia de diaclasas consiste en un conjunto de diaclasas con la misma orientación, y cuando hay varias familias que se interceptan en un macizo, se les denomina sistema de diaclasas del macizo.

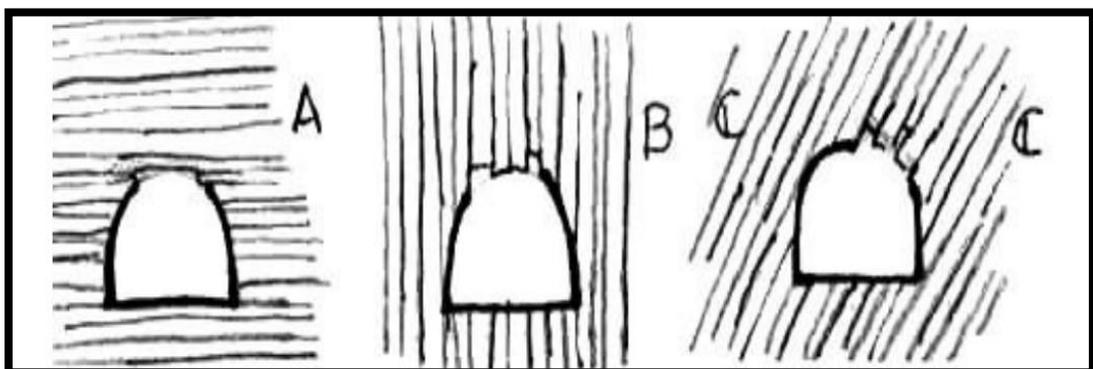


Figura 5. Estratificación y esquistosidad en relación con un túnel: A. discontinuidades horizontales; B. discontinuidades verticales; C. discontinuidades oblicuas.

Las diaclasas pueden ser abiertas o cerradas y pueden estar cementadas o no. Además, pueden ser paralelas a los planos de estratificación en rocas sedimentarias o a los planos de clivaje en rocas metamórficas.

Generalmente, un macizo presenta tres familias de fracturas o diaclasas relacionadas con esfuerzos; si hay más de tres, indica que hay superposición de esfuerzos.

a) Parámetros de discontinuidades

- **Orientación**

Se refiere a la posición espacial determinada por el rumbo y el buzamiento de la superficie de discontinuidad. Es fundamental considerar la orientación de los bloques y las fracturas para evaluar la estabilidad (6).

- **Espaciamiento**

Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de la misma familia. Es importante señalar que el espaciamiento aparente, que se observa en la superficie de la roca, suele ser mayor que el real (6). Se utiliza un promedio para su medición (6).

- **Persistencia**

Es la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento, y se analiza estadísticamente utilizando criterios probabilísticos, al igual que el espaciamiento (6). Cuando hay persistencia, se asegura el flujo de agua a través de la masa (6).

- **Rugosidad**

Se refiere a la rugosidad de la superficie y a la ondulación de la discontinuidad, ya que ambos factores influyen en la resistencia del macizo rocoso. Una mayor rugosidad incrementa la resistencia a la fricción (6).

- **Resistencia de las paredes de la discontinuidad**

Generalmente, se refiere a la resistencia a la compresión inconfiada, ya que es un buen indicador de la alteración en las paredes de la discontinuidad (6). La resistencia se incrementa con la presencia de protuberancias en la roca a lo largo de la discontinuidad (6).

- **Abertura**

Es la distancia perpendicular entre las paredes de las diaclasas cuando no contienen relleno, solo agua o aire.

También existen diaclasas cerradas (6).

- **Relleno**

Se refiere al material situado entre las paredes de la discontinuidad, que generalmente es más blando que el macizo rocoso (6). Un parámetro importante del material de relleno es su grado de cementación (6).

- **Agua subterránea**

Agua presente en la discontinuidad que puede estar libre o en movimiento. Se caracteriza por su caudal y es necesario evaluar si el agua sale o no con presión (6).

- **Número de familias presentes**

Es un indicador del grado de fractura miento del macizo, y su variabilidad depende de la dirección y tipo de esfuerzos (6).

El número mínimo de familias en un macizo es tres, y estas familias presentan características distintivas, no solo en cuanto a dirección y espaciamiento, sino también en lo que respecta a condiciones de relleno, caudal e incluso en su edad y tipo de esfuerzos que las generan (6).

- **Tamaño de bloques**

Se cuantifica utilizando metodologías específicas. También es importante identificar los bloques críticos, que son aquellos de tamaño finito que tienen el potencial de desprenderse (6).

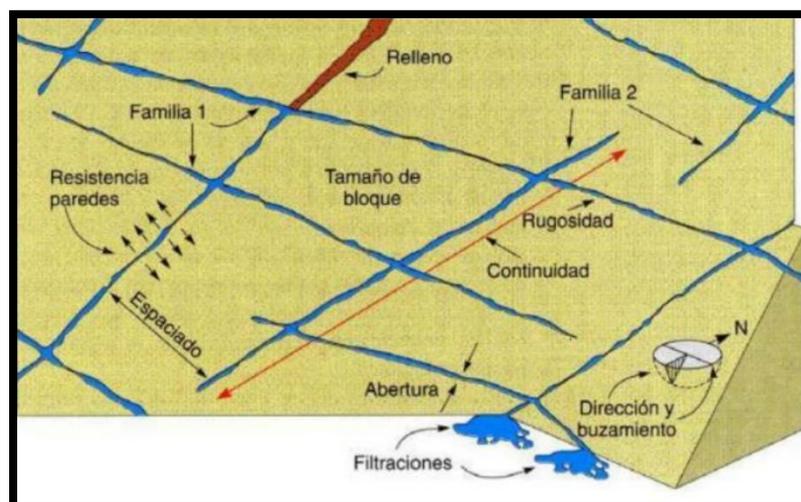


Figura 6. Parámetros de las discontinuidades presentes en una formación rocosa

2.2.6 Estabilidad del macizo

➤ Estabilidad general

En un macizo rocoso se analiza el material rocoso, el sistema de diaclasas, las condiciones del agua y las condiciones de esfuerzo. En el material rocoso se evalúan la compresión inconfiada y la resistencia a la tracción mediante núcleos de prueba (6).

En el sistema de diaclasas, se consideran parámetros como rugosidad, separación (distancia), abertura (tamaño de bloques), rellenos, orientación (número de familias), persistencia y continuidad. En cuanto a las condiciones del agua, se evalúan tanto la cantidad como los efectos del agua, así como las características físicas y químicas, y las variaciones del caudal a lo largo del tiempo. En lo que respecta a las condiciones de esfuerzo, se examinan la cantidad, la tasa y la dirección de los cambios en la masa y en la carga, pudiendo incluir la necesidad de estudios sobre sismicidad local (6).

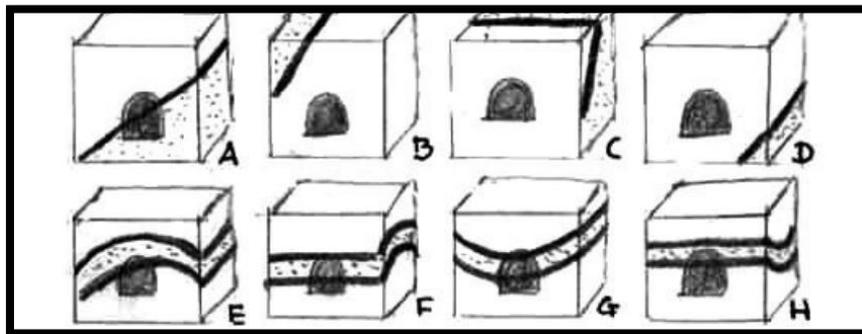


Figura 7. La falla se extiende junto al túnel; B. y D. la falla no intercepta el túnel; C. la falla lo corta de manera transversal; E. y F. el túnel está ubicado en un anticlinal; G. y H. el túnel atraviesa un sinclinal

➤ Estabilidad cinemática

Para determinar la estabilidad de un bloque rígido y prever una posible falla de talud en un macizo rocoso, es fundamental examinar las características geométricas que definen el tamaño, la forma y la disposición de los bloques o cuñas de roca, aplicando un análisis de estabilidad o inestabilidad cinemática (6).

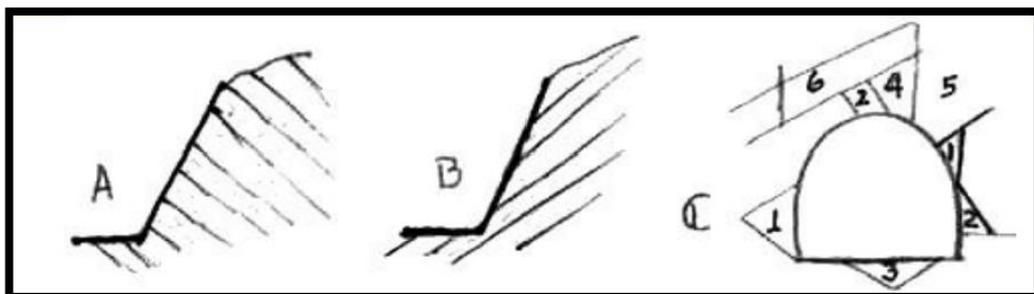


Figura 8. Estabilidad de cuñas de roca: A. talud que es cinemáticamente estable. B. talud que presenta inestabilidad cinemática. C. bloques generados en las paredes de un túnel

➤ **Auscultación y túneles y galerías**

El proceso se enfoca en analizar la dinámica de los fenómenos en la masa rocosa en relación con la galería, especialmente en términos de esfuerzos, deformaciones y degradaciones causadas por agentes ambientales. El objetivo es asegurar la estabilidad y el funcionamiento de la estructura (6).

2.2.7 Reglamentación de ingeniería del macizo rocoso - D.S. 023

Art. 213.- Durante la realización de labores mineras, ya sean horizontales, inclinadas o verticales, se llevará a cabo un sostenimiento sistemático inmediato basado en estudios geomecánicos, antes de proseguir con las perforaciones en el frente de avance, siguiendo el principio de "trabajo avanzado, trabajo sostenido, en lo que sea pertinente (7).

Art. 214.- Durante las fases de exploración y explotación, así como en la reparación y desarrollo de la mina, el titular de la actividad minera debe considerar: a) Que, según el estudio geomecánico realizado, el plan de minado debe contemplar las condiciones más adversas de la masa rocosa del yacimiento mineralizado. Esto es esencial para seleccionar el método de explotación que implique el menor riesgo, garantizando la seguridad de los trabajadores y maquinarias, así como: una alta recuperación del mineral, la estabilidad de las excavaciones y una buena productividad (7).

2.2.8 Caracterización geomecánica

a) Rock Mass Rating

El RMR, una clasificación geomecánica de uso común, se utiliza para identificar el tipo de macizo rocoso y aplicar el soporte adecuado según las evaluaciones realizadas. Originalmente creado para definir el refuerzo necesario en túneles, actualmente también se emplea para analizar la estabilidad de taludes (8).

Según Bieniawski, la evaluación minuciosa del RMR implica tener en cuenta lo siguiente:

- La resistencia de la roca intacta puede evaluarse mediante ensayos de carga puntual en laboratorio o a través del uso de un martillo geológico (8).
- El Índice de calidad del testigo (RQD) puede determinarse utilizando muestras de testigos o aplicando fórmulas en la superficie (8).
- El espaciamiento entre discontinuidades se define como la distancia que existe entre dos discontinuidades (8).

- La condición de las discontinuidades se evalúa considerando varios aspectos: la distancia entre las discontinuidades, la abertura de las discontinuidades, la rugosidad de las superficies de las discontinuidades, el relleno presente en las discontinuidades, el grado de alteración de las discontinuidades (8).
- La presencia de agua subterránea en el macizo rocoso.

Para determinar el índice de resistencia del macizo rocoso (RMR), se otorga un valor a cada uno de estos parámetros, que luego se suman para obtener el RMR total del macizo en cuestión (8).

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

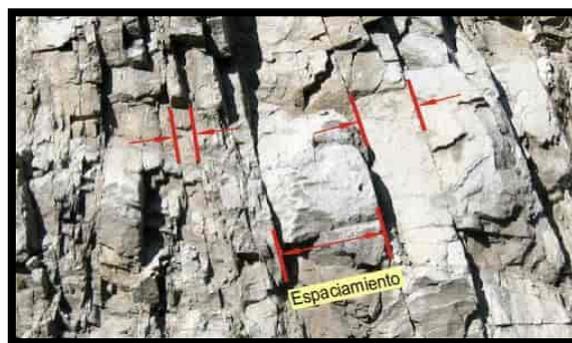


Figura 9. Matriz rocosa

Tabla 2. Parámetros de clasificación geomecánica según Bieniawski

1	Resistencia del macizo rocoso (MPa)	Ensayo de carga Puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
		Puntuación	20	17	13	6	5		
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
		Puntuación	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10litros/m in	10-25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min		
		Relación de agua / Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

Tabla 3. Categoría de clasificación geomecánica

VALOR DE RMR	Clasificación del Macizo Rocoso	Clase
81 – 100	Muy Bueno	I
61 – 80	Bueno	II
41 – 60	Medio	III
21 – 40	Malo	IV
0 – 20	Muy Malo	V

b) Índice de calidad de las rocas

El índice de calidad de la roca (RQD, por sus siglas en inglés Rock Quality Designation Index). fue creado para medir la calidad de la masa rocosa, utilizando la recuperación de testigos de perforación diamantina como base. Para calcular el RQD de un testigo, se suman todas las secciones individuales que superen los 10 cm de longitud y se dividen por la longitud total del testigo recuperado durante la perforación diamantina (9).

$$RQD = \frac{\sum \text{Fragmentos del testigo} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Largo Total del Testigo}} \times 100$$

Si no hay testigos disponibles y es necesario calcular el RQD, se pueden utilizar ecuaciones específicas para llevar a cabo este cálculo sin depender de la presencia de un testigo. A continuación, se presentan estas ecuaciones. (9)

$$RQD = 115 - 33 * JV$$

para $JV > 4.5$

$$RQD = 100$$

para $JV \leq 4.5$

En este contexto, JV indica el número de discontinuidades que hay en la masa rocosa por metro cúbico. Al aplicar cualquiera de estas fórmulas, se obtiene el valor del RQD, que permite evaluar la calidad de la roca de acuerdo con la siguiente tabla (9).

Tabla 4. Calidad de RQD

RDQ %	Calidad de roca
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy Buena

La cantidad y el grado de alteración de las fracturas desempeñan un papel crucial en las formaciones rocosas, ya que este parámetro determina el tipo de roca, como se especifica en la tabla siguiente (9).

c) Índice de resistencia geológica

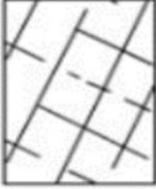
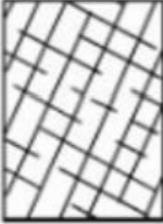
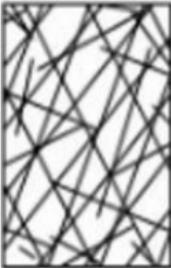
El índice de soporte geomecánico (GSI) es una clasificación que se fundamenta en la evaluación de dos aspectos clave: el estado de la superficie y el grado de estructuración (8).

El proceso de clasificación consiste en observar la zona más fracturada del área en avance, donde se mide un metro cuadrado y se contabiliza el número de fracturas que lo cruzan, seguido de la aplicación de golpes con un picote o martillo geológico (8).

A partir de estas observaciones de la superficie y la condición estructural, se determina el índice GSI del macizo rocoso utilizando una tabla específica que se presentará más adelante. Es relevante mencionar que cada unidad minera subterránea cuenta con su propia tabla GSI adaptada a su contexto y al tipo de soporte que emplea (8).

Tabla 5. Estimación del GSI

<p>Características del Macizo Rocos según GSI Modificado:</p> <p>Se contabiliza la cantidad de fracturas por metro lineal medidas IN SITU.</p> <p>Para determinar la resistencia de la roca IN SITU, se hace uso del martillo geológico (golpeando la roca). También se considera: rugosidad, alteración y relleno de las discontinuidades.</p> <p>ESTRUCTURAS</p>	<p>CONDICIONES SUPERFICIALES</p>	<p>Muy Buena (Extremadamente resistente fresca) Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas. (Se astilla con golpes de picota)</p>	<p>Buena (Muy Resistente, Levemente Alterada) Discontinuidades rocosas, Leventm aller.manchas de oxidación (se rompen con varios golpes de picota)</p>	<p>Regular (Resistente y Levemente Alterada) Discontinuidades lisas, Moderadamente alteradas, ligeramente abiertas (se rompen con uno o dos golpes de picota)</p>	<p>Mala (Moderamt. Resistente, moderamt. alterada) Superficies pulidas o con estrías, muy alteradas, relleno compacto o con fracturas de rocas. (se indenta superficiales)</p>	<p>Muy Mala (Blanda, muy alterada) Superficies pulidas y estrías, muy abiertas con relleno de arcillas blandas. (se disgrega profundamente)</p>
--	---	---	---	--	---	--

<p>Levemente Fracturada</p>  <p>Igual o menor a 3 sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre sí. (RQD 75 – 90%) De 2 a 6 fract/metro.</p>	LF/MB	LF/B	LF/R	LF/M	LF/MM
<p>Moderadamente Fracturada</p>  <p>Muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas, de discontinuidades ortogonales (RQD 50 – 75%) De 6 a 12 fract/metro.</p>	F/MB	F/B	F/R	F/M	F/MM
<p>Muy Fracturada</p>  <p>Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades. (RQD 25 – 50%) De 12 a 20 fract/metro.</p>	MF/MB	MF/B	MF/R	MF/M	MF/MM
<p>Intensamente Fracturada</p>  <p>Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades, interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 – 25%) Más de 20 fract/metro.</p>	IF/MB	IF/B	IF/R	IF/M	IF/MM
<p>Triturada o Brechada</p>  <p>Ligeramente trabada, masa rocosa, extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos redondeados. (SIN RQD)</p>	T/MB	T/B	T/R	T/M	T/MM

Nota:

➤ **Condición de estructura**

(LF=Levemente fracturada, F= Moderadamente fracturada, MF= Muy fracturada, IF= Intensamente fracturada, T= Triturada o brechada).

➤ **Condición de superficie**

(MB= Muy buena, B= Buena, R= Regular, M= Mala, MM= Muy mala)

d) Correlación entre RMR y GSI

Para establecer la relación entre el índice de soporte geomecánico (GSI) y el Índice de resistencia del macizo rocoso (RMR), es importante indicar qué tipo de RMR se ha utilizado. A continuación, se detallan los diferentes tipos de RMR empleados (8).

En el caso del RMR 76:

- Si RMR76 es mayor a 18, entonces GSI es igual a RMR76.
- Si RMR76 es menor a 18, no se puede utilizar RMR76 para calcular el GSI.

En cuanto al RMR89:

- Si RMR89 es mayor a 23, entonces GSI se calcula como RMR89 menos 5.
- Si RMR89 es menor a 23, no se puede utilizar RMR89 para determinar el GSI.

2.3 Definición de términos

➤ **Discontinuidad**

Cualquier plano de origen mecánico o sedimentario en un macizo rocoso que presenta una resistencia a la tracción inexistente o muy baja. Esto provoca un comportamiento discontinuo en la matriz rocosa, que suele ser anisótropo (10).

➤ **Roca**

Conjunto natural de partículas de uno o más minerales que están fuertemente unidas de manera cohesiva y forman masas geológicamente independientes y susceptibles de ser cartografiadas. (10).

➤ **Macizo rocoso**

Conjunto formado por la matriz rocosa y las discontinuidades. Se caracteriza por ser heterogéneo, presentar un comportamiento discontinuo y, por lo general, ser anisótropo, lo cual es resultado de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que influyen en su comportamiento geomecánico e hidráulico (10).

➤ **Puente**

Los puentes son estructuras diseñadas para atravesar obstáculos naturales como ríos, valles, lagos o brazos de mar, así como obstáculos artificiales como vías férreas o carreteras. Su

propósito es facilitar el transporte de mercancías, permitir la circulación de personas y trasladar materiales de un lugar a otro (11).

➤ **Galería**

Las galerías mineras son pasajes de acceso a una mina que marcan el inicio de la excavación de un pozo. Se pueden describir como cavidades subterráneas, ya sean naturales o artificiales, con una inclinación horizontal o casi horizontal (12).

➤ **Efectos de aguas subterráneas**

El comportamiento de las rocas está influenciado por el agua subterránea de dos formas diferentes. Primero, en rocas porosas como las areniscas, esta influencia es clara y se basa en el principio de Terzaghi o de la tensión efectiva (13). En segundo lugar, en macizos rocosos compuestos principalmente por materiales poco porosos, que es lo más común en la mayoría de las rocas, el agua a presión en las juntas entre los bloques de roca disminuye la presión efectiva en los bordes de la junta, reduciendo así la resistencia al corte derivado de la fricción (13). Finalmente, un efecto más sutil del agua es su acción degradante en diversas áreas del macizo, lo que provoca un deterioro considerable de las propiedades mecánicas de ciertos materiales, como una disminución en la resistencia y un aumento en la deformabilidad (13).

➤ **Meteorización**

La meteorización se define como el proceso de alteración físico-química de las rocas en la superficie, resultante de su interacción con soluciones atmosféricas, ya sean líquidas o gaseosas. Su relevancia se debe a su efecto en las propiedades mecánicas de los materiales afectados, así como en las características de fricción de las superficies implicadas (13).

Cuando una roca sufre un grado elevado de meteorización, se transforma en un material desagregado o poco cementado conocido como suelo. A medida que un macizo rocoso se meteoriza, tiende a adquirir características propias de estos materiales (13).

Durante esta transición, se hace referencia a la formación de "roquisuelos" o a la coexistencia de rocas blandas con suelos duros. Aunque no se abordan todos los aspectos tratados en la mecánica de rocas, estos ejemplos evidencian que esta disciplina trasciende la mecánica aplicada tradicional, incorporando técnicas más amplias (13)

➤ **Aplicación de mecánica de rocas en la minería**

La extracción de un mineral, ya sea mediante minería subterránea o a cielo abierto, requiere llevar a cabo diversas excavaciones. El diseño de estas excavaciones y su análisis de estabilidad son aspectos abordados por la mecánica de rocas (13).

➤ **Rugosidad**

La textura de los bordes de una discontinuidad tiene un efecto considerable en su resistencia al corte. Esta influencia se reduce a medida que se incrementa la apertura de la discontinuidad y el grosor del relleno. Para evaluar la textura de una discontinuidad, se pueden considerar dos factores: su ondulación y su aspereza (13).

Las ondulaciones se refieren a las irregularidades a gran escala que provocan una expansión o dilatación significativa de la discontinuidad durante un movimiento de cizallamiento, siempre que ambos lados estén en contacto (13).

➤ **Minería subterránea**

Se refiere a un conjunto de cavidades formadas bajo la superficie terrestre con el objetivo de extraer recursos minerales de valor económico considerable (14).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Métodos y alcances de la investigación

3.1.1 Método general

El enfoque metodológico será cuantitativo, ya que se analizarán datos técnicos relacionados con las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, su estabilidad y su relación con la recuperación del puente mineralizado. Se emplearán técnicas de análisis numérico y modelación geotécnica para determinar las variables críticas que influyen en la estabilidad del macizo.

3.1.2 Tipo de investigación

La investigación será de tipo aplicada, dado que busca resolver un problema práctico relacionado con la estabilidad del macizo rocoso y su impacto en la operación minera. Los resultados del estudio tendrán una utilidad directa en la toma de decisiones para la recuperación del puente mineralizado.

3.1.3 Nivel de investigación

El nivel de la investigación descriptivo correlacional, ya que se buscará identificar y explicar de qué manera el análisis de estabilidad del macizo rocoso influye en la recuperación del puente mineralizado. Se pretende determinar las causas de las posibles inestabilidades y sus efectos en las actividades mineras.

3.2 Diseño de investigación

El diseño será no experimental, transversal y correlacional. No experimental porque no se manipularán las variables; en su lugar, se observarán y medirán los datos del macizo rocoso y su influencia en la recuperación del puente mineralizado. Es transversal porque se recogerán

datos en un momento específico durante la recuperación de la zona, y correlacional porque se analizarán las relaciones entre las variables geomecánicas y la estabilidad del macizo.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Población: la población está conformado por:

- Tajeo: TJ 921 Adela
- Unidad minera: Yaruchagua Glore Perú S. A. C.

3.3.2 Muestra

Muestras: la muestra censal está conformado por:

- Tajeo: TJ 921 Adela
- Unidad minera: Yaruchagua Glore Perú S. A. C.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

- Observación
- Encuesta
- Entrevista
- Revisión bibliográfica

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

- Ficha de observación
- Encuesta estructurada
- Entrevista personalizada
- Reglamentos, libros especializados, normas, revistas indexadas

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Generalidades

4.1.1 Ubicación

La mina está situada en la sierra central del Perú, específicamente en el distrito de Santa Ana de Tusi, provincia de Daniel Alcides Carrión, en la región Pasco. Se encuentra a aproximadamente 313 kilómetros de Lima por vía terrestre. Sus coordenadas geográficas en el sistema UTM-WGS84, tomando como referencia un punto central del campamento, son N: 8°845,528 y E: 354419.

4.1.2 Acceso

El acceso al centro de operaciones de Glore Perú S. A. C. (mina Yaruchagua) se realiza desde Lima mediante la ruta principal: Lima – Cerro de Pasco por vía terrestre, con una distancia de 313 kilómetros. Posteriormente, se continúa por la carretera afirmada Cerro de Pasco – Mina Yaruchagua, a lo largo de 120 kilómetros. El tiempo estimado de viaje oscila entre 8 y 10 horas.

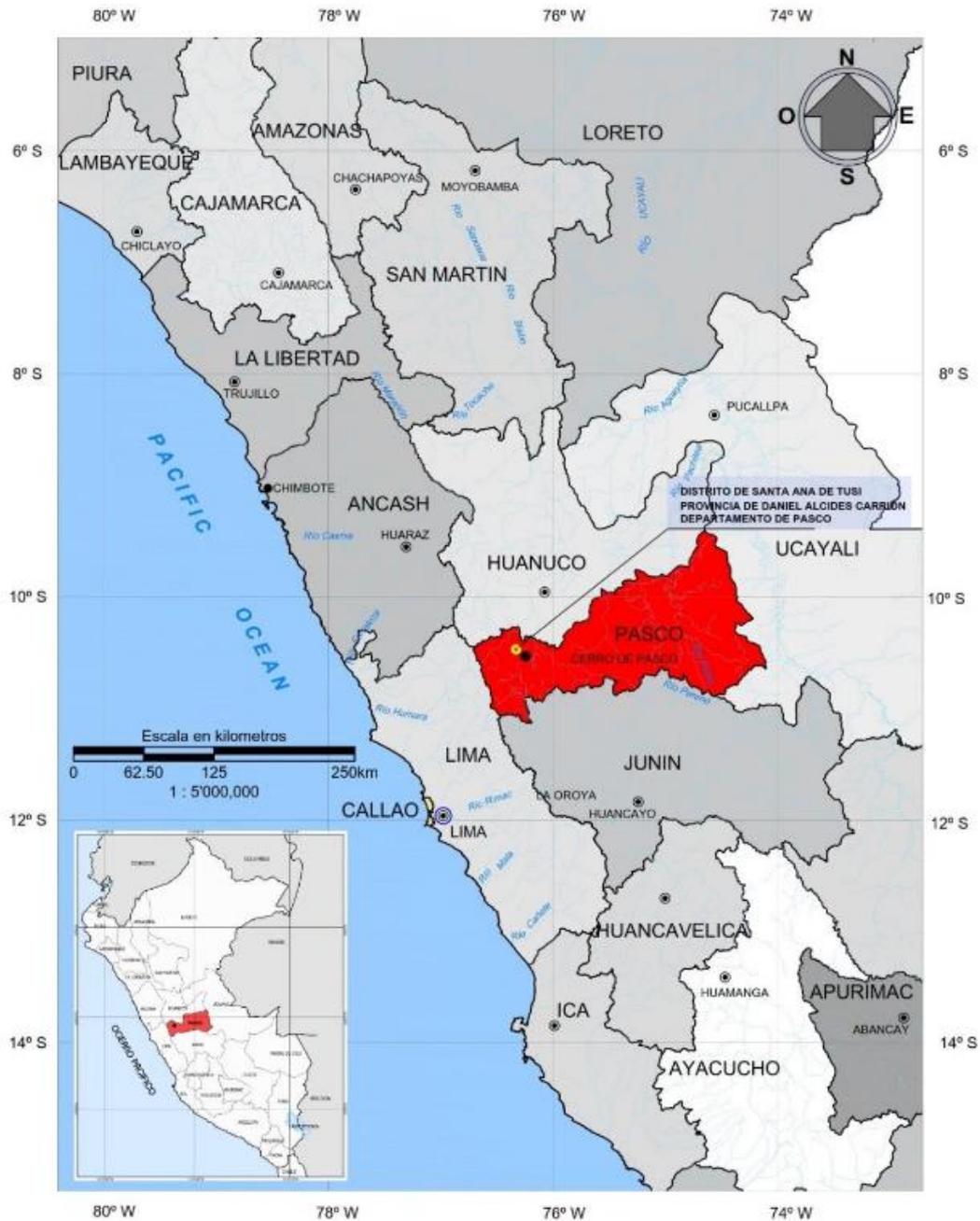


Figura 10. Mapa de ubicación departamental de la unidad minera Yaruchagua-Glore Peru S. A. C.

4.2 Geología

4.2.1 Geología general

En las cercanías del distrito minero Yaruchagua, se expone la secuencia sedimentaria y metamórfica del grupo Excelsior del Devónico superior, compuesto por areniscas, limolitas y pizarras. Este grupo se encuentra sobre el grupo Mitú del Carbonífero tardío, que presenta una discordancia angular y está formado por areniscas conglomerádicas y conglomerados. Encima de este grupo, en posición subhorizontal, se hallan las calizas grises del grupo Pucará, que pertenecen al Triásico superior a Jurásico inferior.

4.2.2 Geología local

Las principales estructuras son las vetas Yaruchagua y Clarita, que son rellenos de fallas de cizalla, e incluyen componentes de movimientos laterales, como falsas cajas. Las texturas minerales observadas en las vetas indican que la mineralización se depositó en aberturas ya existentes, siendo luego alterada por movimientos posteriores que fragmentaron y deformaron la estructura original. Otras vetas relevantes son la veta Katherine, localizada al sureste y noroeste de las vetas Yaruchagua y Clarita.

4.2.3 Tipo de yacimiento

El yacimiento de Yaruchagua es un depósito mineral polimetálico que contiene Ag, Pb, Zn, Cu, Au, Sb, y es de tipo mesotermal. Se encuentra emplazado en rocas sedimentarias y metamórficas, principalmente del grupo Excelsior del Devónico tardío, que han sido invadidas por un intrusivo Diorítico a microdiorítico. Este intrusivo presenta un *stockwork* de óxidos en la superficie y, dentro de la mina, se observa un *stockwork* de sulfuros como plata roja, argentita, calcopirita, galena, estibina y pirita. La veta es una estructura de relleno de falla con forma de “lazo cimoide”, tiene una longitud aproximada de 600 metros, con un azimut promedio de N315° y buzamiento de 50°-75° hacia el noreste. La mina Yaruchagua está ubicada dentro de la franja de yacimientos polimetálicos en ambientes sedimentarios y metamórficos, que incluye yacimientos conocidos como Milpo, Atacocha, Jogochucho, Cabeza de Toro, Vinchos, Marcococha, entre otros, con un lineamiento NW-SE correspondiente al sistema andino.

4.2.4 Mineralización hipógena:

La baritina y el cuarzo son los principales materiales de relleno en las vetas de todo el distrito, acompañados de otras gangas minerales como la pirita y la calcita. La mineralización está compuesta por cuarzo hialino, sulfosales de plata (pirargirita, proustita), y sulfuros masivos de galena, esfalerita, calcopirita, estibinita y arsenopirita.

- **Veta Yaruchagua**

Es una estructura de relleno de falla con un rumbo promedio de N315° y un buzamiento de 50°-75°NE. La longitud reconocida de la veta es aproximadamente 1 km, extendiéndose desde la zona central hasta el sureste y el noroeste. La mineralización incluye cuarzo hialino, sulfosales de plata, sulfuros masivos, argentita, galena cristalizada, galena argentífera, esfalerita, esfalerita ferrosa (marmatita), calcopirita, estibinita y pirita. La potencia de la veta varía entre 0.50 y 1.0 metros, aunque en ciertos tramos se presentan ensanches de hasta 3.0 metros, con formaciones de lazos Cimoide en el piso y techo de la veta.

La alteración hidrotermal predominante es la argílica, con silicificación en áreas muy localizadas. La oxidación es intensa, observándose limonita, hematita y jarosita, generalmente de forma diseminada. La roca caja del yacimiento está formada por una alternancia de microdioritas y dioritas, que intruyen las areniscas, limolitas y pizarras del grupo Excelsior. Estructuralmente, la veta Yaruchagua tiene una forma de “lazo cimoide”, con inflexiones tanto horizontales como verticales, y desarrollos de ramales en el piso y techo de la veta. Está reconocida en tres niveles: Chosica, Katherine y Adela.

- **Veta Clarita**

Es una estructura de relleno de falla con un rumbo de N315° y un buzamiento de 50°-65°NE. Su longitud reconocida es de 800 metros. La mineralización está compuesta por baritina y cuarzo, sulfosales de plata, sulfuros masivos de galena, estibina, marmatita, calcopirita y pirita.

- **Veta Katherine**

Ubicada al sureste de la veta Yaruchagua, es también una estructura de relleno de falla con un rumbo promedio de N70°-70°SE, con un ancho que varía entre 0.30 y 1.0 metros. La mineralización está compuesta por galena, esfalerita, calcopirita, estibnita, sulfosales de plata, pirita, arsenopirita y cuarzo. La veta Katherine se encuentra en la secuencia sedimentaria y metamórfica del grupo Excelsior, formada por una alternancia de areniscas, limolitas y pizarras, intruida por dioritas a microdioritas, que datan del Pérmico temprano al Pérmico tardío.

Este sector ha experimentado reactivaciones de fallas, similares a las del yacimiento Yaruchagua, con posibles fases de fluidos hidrotermales mineralizantes, lo cual puede observarse en las diversas fallas y estructuras mineralizadas en las antiguas labores subterráneas.

En el nivel Adela, además de cortar las estructuras de las vetas Yaruchagua, Clarita y Katherine, se han intersectado las vetas Tania, Ángela, Jacqueline y Generosa. Estas son fallas tensionales rellenas con mineralización de baritina-cuarzo, con platas rojas, estibina, galena, calcopirita y pirita. Los anchos de estas vetas varían de 0.30 a 0.70 metros, y sus longitudes reconocidas oscilan entre 120 y 150 metros.

4.3 Caracterización geomecánica

4.3.1 Clasificación geomecánica de masa rocosa

El proceso de clasificación geomecánica de la masa rocosa implica “analizar e interpretar” información desarrollada usando el sistema de “clasificación geomecánica RMR₈₉ de

Bieniawski, modificado por Romana el 2000". Los valores de resistencia a compresión de la roca fueron estimados usando picota de geólogo y muestra de laboratorio de estudios anteriores, los valores del índice de calidad de roca R.Q.D. fueron determinados mediante el registro volumétrico de diaclasas utilizando la relación propuesta por Palmstrom:

$$RQD=115-3.3J_v$$

Donde:

J_v: Número de discontinuidades/m³.

Según información obtenida en campo, se ha determinado la calidad de masa rocosa usando el sistema de clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski-1989, definiendo dominios geomecánicos en rangos de calidad según el criterio mostrado en la tabla 6.

La zona del TJ 921 de Adela, se emplaza en rocas Dioríticas de roca intacta con resistencia a compresión que esta de 105 MPa, con sistema de familia de discontinuidades bien marcados con relleno semiduro a moderadamente alterado. Realizando el análisis con RMR de Bieniawski-1989 se realiza el resumen del mapeo geomecánico (ver figura N°11).

Tabla 6. Criterio para la clasificación geomecánica

Código	Rango RMR	Clase de roca
II	80-61	Buena
IIIA	60- 51	Regular A
IIIB	50 - 41	Regular B
IVA	40 - 31	Mala A
IVB	30 -21	Mala B
V	< 20	Muy mala

Tabla 7. RMR – Bieniawski (1989)

Punto de Mapeo	PARAMETROS	VAL	1. RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)	2. RQD	3. ESPACIAMIENTO (m)	4. CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES					5. AGUA SUBTERRANEA	6. AJUSTE POR ORIENTACION	VALOR TOTAL RMR BASICO (Suma de valoracion 1 a 5)	VALOR TOTAL RMR AJUSTADO (Suma de valoracion 1 a 6)
						Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración				
			1.- > 250 Mpa 2.- 100-250 Mpa 3.- 50-100 Mpa 4.- 25-50 Mpa 5.- < 25 Mpa	20 17 13 8 3	20 15 10 8 5	6 4 2 1 0	6 5 4 1 0	6 5 3 1 0	6 4 2 1 0	6 5 3 1 0	15 10 7 4 0	0 -2 -5 -10 -12		
12			1.- > 250 Mpa 2.- 100-250 Mpa 3.- 50-100 Mpa 4.- 25-50 Mpa 5.- < 25 Mpa	8	8	4	5	5	4	5	10	10	61	51
			1.- > 2 m 2.- 0.6-2 m 3.- 200-600 mm 4.- 60-200 mm 5.- < 60 mm											
			1.- > 2 m 2.- 1-3 m 3.- 3-10 m 4.- 10-20 m 5.- > 20 m											
			1.- Cerrada 0 2.- Muy Angosta < 0.1 mm 3.- Angosta 0.1 - 1.0 mm 4.- Abierta 1.0 - 5.0 mm 5.- Muy abierta > 5.0 mm											
			1.- Muy rugoso 2.- Rugoso 3.- Ligeramente rugosa 4.- Lisa 5.- Muy lisa											
			1.- Ninguna 2.- Relleno duro <5mm 3.- Relleno duro >5mm 4.- Relleno blando <5mm 5.- Relleno blando >5mm											
			1.- No meteorizada 2.- Ligeramente 3.- Moderadamente 4.- Altamente meteorizada 5.- Descompuesta											
			1.- Completamente seco 2.- Húmedo 3.- Mojado 4.- Goteo 5.-Flujo											
			1.- Muy favorable 2.- Favorable 3.- Regular 4.- Desfavorable 5.- Muy desfavorable											

Estación geomecnica: Adela

Tabla 8. Mapeo geomecánico con Q de Barton

Estacion Geotecnica:		0		Q - BARTON		Valor de Q: 10.7																																																																																																																									
Rock Quality Designation <table border="1"> <tr><th>RQD</th><th></th></tr> <tr><td>Muy mala</td><td>0-25</td></tr> <tr><td>Mala</td><td>25-50</td></tr> <tr><td>Regular</td><td>50-75</td></tr> <tr><td>Buena</td><td>75-90</td></tr> <tr><td>Excelente</td><td>90-100</td></tr> </table> <p>Cuando RQD < 10, se utiliza un valor de 10 para Q</p>				RQD		Muy mala	0-25	Mala	25-50	Regular	50-75	Buena	75-90	Excelente	90-100	RQD = 46		Numero de alteración <table border="1"> <tr><th>Ja</th><th></th></tr> <tr><td>Bien trabadas</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>No alteradas, patinas locales</td><td>1</td></tr> <tr><td>Ligeramente alteradas, patinas que no se ablandan</td><td>2</td></tr> <tr><td>Patinas limo arenosas, poca arcilla, no se ablandan</td><td>3</td></tr> <tr><td>Patinas de minerales arcillosos que se ablandan</td><td>4</td></tr> <tr><td>Patinas de arena, libres de arcilla</td><td>6</td></tr> <tr><td>Relleno que no se ablanda, espesor < 5mm</td><td>8</td></tr> <tr><td>Relleno que se ablanda, espesor < 5mm</td><td>8-12</td></tr> <tr><td>Rellenos expansivos</td><td>6-24</td></tr> </table>		Ja		Bien trabadas	0.75	No alteradas, patinas locales	1	Ligeramente alteradas, patinas que no se ablandan	2	Patinas limo arenosas, poca arcilla, no se ablandan	3	Patinas de minerales arcillosos que se ablandan	4	Patinas de arena, libres de arcilla	6	Relleno que no se ablanda, espesor < 5mm	8	Relleno que se ablanda, espesor < 5mm	8-12	Rellenos expansivos	6-24	Ja = 1																																																																																							
RQD																																																																																																																															
Muy mala	0-25																																																																																																																														
Mala	25-50																																																																																																																														
Regular	50-75																																																																																																																														
Buena	75-90																																																																																																																														
Excelente	90-100																																																																																																																														
Ja																																																																																																																															
Bien trabadas	0.75																																																																																																																														
No alteradas, patinas locales	1																																																																																																																														
Ligeramente alteradas, patinas que no se ablandan	2																																																																																																																														
Patinas limo arenosas, poca arcilla, no se ablandan	3																																																																																																																														
Patinas de minerales arcillosos que se ablandan	4																																																																																																																														
Patinas de arena, libres de arcilla	6																																																																																																																														
Relleno que no se ablanda, espesor < 5mm	8																																																																																																																														
Relleno que se ablanda, espesor < 5mm	8-12																																																																																																																														
Rellenos expansivos	6-24																																																																																																																														
Numero de sets <table border="1"> <tr><th>Jn</th><th></th></tr> <tr><td>Roca masiva</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Pocos sets aleatorios</td><td>1</td></tr> <tr><td>1 set</td><td>2</td></tr> <tr><td>1 Set + Random</td><td>3</td></tr> <tr><td>2 sets</td><td>4</td></tr> <tr><td>2 Sets + Random</td><td>6</td></tr> <tr><td>3 sets</td><td>9</td></tr> <tr><td>3 Sets + Random</td><td>12</td></tr> <tr><td>4 Sets</td><td>15</td></tr> <tr><td>Roca desintegrada</td><td>20</td></tr> </table>				Jn		Roca masiva	0.5	Pocos sets aleatorios	1	1 set	2	1 Set + Random	3	2 sets	4	2 Sets + Random	6	3 sets	9	3 Sets + Random	12	4 Sets	15	Roca desintegrada	20	Jn = 9		Agua <table border="1"> <tr><th>Jw</th><th></th></tr> <tr><td>Seco (< 5L/m)</td><td>1</td></tr> <tr><td>Moderado</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>Infiltración importante</td><td>0.3-0.5</td></tr> <tr><td>Infiltración importante-con decaimiento</td><td>0.1-0.2</td></tr> <tr><td>Infiltración importante-sin decaimiento</td><td>0.05-0.1</td></tr> </table>		Jw		Seco (< 5L/m)	1	Moderado	0.7	Infiltración importante	0.3-0.5	Infiltración importante-con decaimiento	0.1-0.2	Infiltración importante-sin decaimiento	0.05-0.1	Jw = 0.7																																																																																					
Jn																																																																																																																															
Roca masiva	0.5																																																																																																																														
Pocos sets aleatorios	1																																																																																																																														
1 set	2																																																																																																																														
1 Set + Random	3																																																																																																																														
2 sets	4																																																																																																																														
2 Sets + Random	6																																																																																																																														
3 sets	9																																																																																																																														
3 Sets + Random	12																																																																																																																														
4 Sets	15																																																																																																																														
Roca desintegrada	20																																																																																																																														
Jw																																																																																																																															
Seco (< 5L/m)	1																																																																																																																														
Moderado	0.7																																																																																																																														
Infiltración importante	0.3-0.5																																																																																																																														
Infiltración importante-con decaimiento	0.1-0.2																																																																																																																														
Infiltración importante-sin decaimiento	0.05-0.1																																																																																																																														
Numero de rugosidad <table border="1"> <tr><th>Jr</th><th></th></tr> <tr><td><u>Discontinua</u></td><td></td></tr> <tr><td>Pulida</td><td>2</td></tr> <tr><td>Suave</td><td>3</td></tr> <tr><td>Rugosa</td><td>4</td></tr> <tr><td>Rellena</td><td>1.5</td></tr> <tr><td><u>Ondulosa:</u></td><td></td></tr> <tr><td>Pulida</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Suave</td><td>2</td></tr> <tr><td>Rugosa</td><td>3</td></tr> <tr><td>Rellena</td><td>1</td></tr> <tr><td><u>Plana</u></td><td></td></tr> <tr><td>Pulida</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Suave</td><td>1</td></tr> <tr><td>Rugosa</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>Rellena</td><td>1</td></tr> <tr><td>No hay contacto entre paredes</td><td>1</td></tr> <tr><td>Espaciamiento mayor a 3 m</td><td>(+1.0)</td></tr> </table>				Jr		<u>Discontinua</u>		Pulida	2	Suave	3	Rugosa	4	Rellena	1.5	<u>Ondulosa:</u>		Pulida	1.5	Suave	2	Rugosa	3	Rellena	1	<u>Plana</u>		Pulida	0.5	Suave	1	Rugosa	1.5	Rellena	1	No hay contacto entre paredes	1	Espaciamiento mayor a 3 m	(+1.0)	Jr = 3		Factor de reducción por esfuerzos <table border="1"> <tr><th>(Esfuerzo/Roca intacta)</th><th>s1/UCS</th><th>SRF</th><th>s1/UCS DE E.G</th></tr> <tr><td>Cerca de superficie (Esfuerzos bajos)</td><td>~0</td><td>2.5</td><td>0.026537</td></tr> <tr><td>Esfuerzos bajos</td><td>0.01 a 0.1</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>Esfuerzos moderados</td><td>0.1 a 0.2</td><td>0.5</td><td></td></tr> <tr><td>Esfuerzos altos</td><td>0.2 a 0.3</td><td>1 a 2</td><td></td></tr> <tr><td>Estallidos de roca o flujo plástico</td><td>0.3 a 0.4</td><td>5 a 10</td><td></td></tr> <tr><td>Grandes Estallidos de rocas/flujo plástico</td><td>>0.4</td><td>10 a 20</td><td></td></tr> <tr><td>Extremos Estallidos de roca/Flujo plástico</td><td>>0.6</td><td>20 a 50</td><td></td></tr> <tr><td>Hinchamiento moderado</td><td></td><td>5 a 10</td><td></td></tr> <tr><td>Hinchamiento severo</td><td></td><td>10 a 15</td><td></td></tr> <tr><td>(Factor para zonas discretas)</td><td></td><td>SRF</td><td></td></tr> <tr><td>No hay zonas débiles/discretas</td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td>Múltiples zonas débiles</td><td></td><td>10</td><td></td></tr> <tr><td>Una zona débil con arcilla (z≤50m)</td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>Una zona débil con arcilla (z>50m)</td><td></td><td>2.5</td><td></td></tr> <tr><td>Zonas múltiples de cizalle (sin arcilla)</td><td></td><td>7.5</td><td></td></tr> <tr><td>Una zona de cizalle libre de arcilla (z≤50m)</td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>Una zona de cizalle libre de arcilla (z>50m)</td><td></td><td>2.5</td><td></td></tr> <tr><td>Estructuras abiertas en forma de cubos</td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>SRF1 vs SRF2: El sistema Q, el mayor valor de SRF</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		(Esfuerzo/Roca intacta)	s1/UCS	SRF	s1/UCS DE E.G	Cerca de superficie (Esfuerzos bajos)	~0	2.5	0.026537	Esfuerzos bajos	0.01 a 0.1	1		Esfuerzos moderados	0.1 a 0.2	0.5		Esfuerzos altos	0.2 a 0.3	1 a 2		Estallidos de roca o flujo plástico	0.3 a 0.4	5 a 10		Grandes Estallidos de rocas/flujo plástico	>0.4	10 a 20		Extremos Estallidos de roca/Flujo plástico	>0.6	20 a 50		Hinchamiento moderado		5 a 10		Hinchamiento severo		10 a 15		(Factor para zonas discretas)		SRF		No hay zonas débiles/discretas		0		Múltiples zonas débiles		10		Una zona débil con arcilla (z≤50m)		5		Una zona débil con arcilla (z>50m)		2.5		Zonas múltiples de cizalle (sin arcilla)		7.5		Una zona de cizalle libre de arcilla (z≤50m)		5		Una zona de cizalle libre de arcilla (z>50m)		2.5		Estructuras abiertas en forma de cubos		5		SRF1 vs SRF2: El sistema Q, el mayor valor de SRF				SRF1 = 1		SRF2 = 	
Jr																																																																																																																															
<u>Discontinua</u>																																																																																																																															
Pulida	2																																																																																																																														
Suave	3																																																																																																																														
Rugosa	4																																																																																																																														
Rellena	1.5																																																																																																																														
<u>Ondulosa:</u>																																																																																																																															
Pulida	1.5																																																																																																																														
Suave	2																																																																																																																														
Rugosa	3																																																																																																																														
Rellena	1																																																																																																																														
<u>Plana</u>																																																																																																																															
Pulida	0.5																																																																																																																														
Suave	1																																																																																																																														
Rugosa	1.5																																																																																																																														
Rellena	1																																																																																																																														
No hay contacto entre paredes	1																																																																																																																														
Espaciamiento mayor a 3 m	(+1.0)																																																																																																																														
(Esfuerzo/Roca intacta)	s1/UCS	SRF	s1/UCS DE E.G																																																																																																																												
Cerca de superficie (Esfuerzos bajos)	~0	2.5	0.026537																																																																																																																												
Esfuerzos bajos	0.01 a 0.1	1																																																																																																																													
Esfuerzos moderados	0.1 a 0.2	0.5																																																																																																																													
Esfuerzos altos	0.2 a 0.3	1 a 2																																																																																																																													
Estallidos de roca o flujo plástico	0.3 a 0.4	5 a 10																																																																																																																													
Grandes Estallidos de rocas/flujo plástico	>0.4	10 a 20																																																																																																																													
Extremos Estallidos de roca/Flujo plástico	>0.6	20 a 50																																																																																																																													
Hinchamiento moderado		5 a 10																																																																																																																													
Hinchamiento severo		10 a 15																																																																																																																													
(Factor para zonas discretas)		SRF																																																																																																																													
No hay zonas débiles/discretas		0																																																																																																																													
Múltiples zonas débiles		10																																																																																																																													
Una zona débil con arcilla (z≤50m)		5																																																																																																																													
Una zona débil con arcilla (z>50m)		2.5																																																																																																																													
Zonas múltiples de cizalle (sin arcilla)		7.5																																																																																																																													
Una zona de cizalle libre de arcilla (z≤50m)		5																																																																																																																													
Una zona de cizalle libre de arcilla (z>50m)		2.5																																																																																																																													
Estructuras abiertas en forma de cubos		5																																																																																																																													
SRF1 vs SRF2: El sistema Q, el mayor valor de SRF																																																																																																																															

Al realizar el mapeo geomecánico, se determina masa rocosa regular (IIIA) con RMR igual a 51 en la zona de estudio del tajo tanto en caja techo, mineral y piso.

De igual forma, se verifica en campo las condiciones actuales de las labores y se delimitan como se muestra en la figura 12. Hacia el NW se muestra zona minado de labor y en zona SE, se muestra colapso de labor (por falla estructural, desprendimiento de cuñas), en la zona intermedia de estos dos puntos indicados se realiza la evaluación de recuperación.

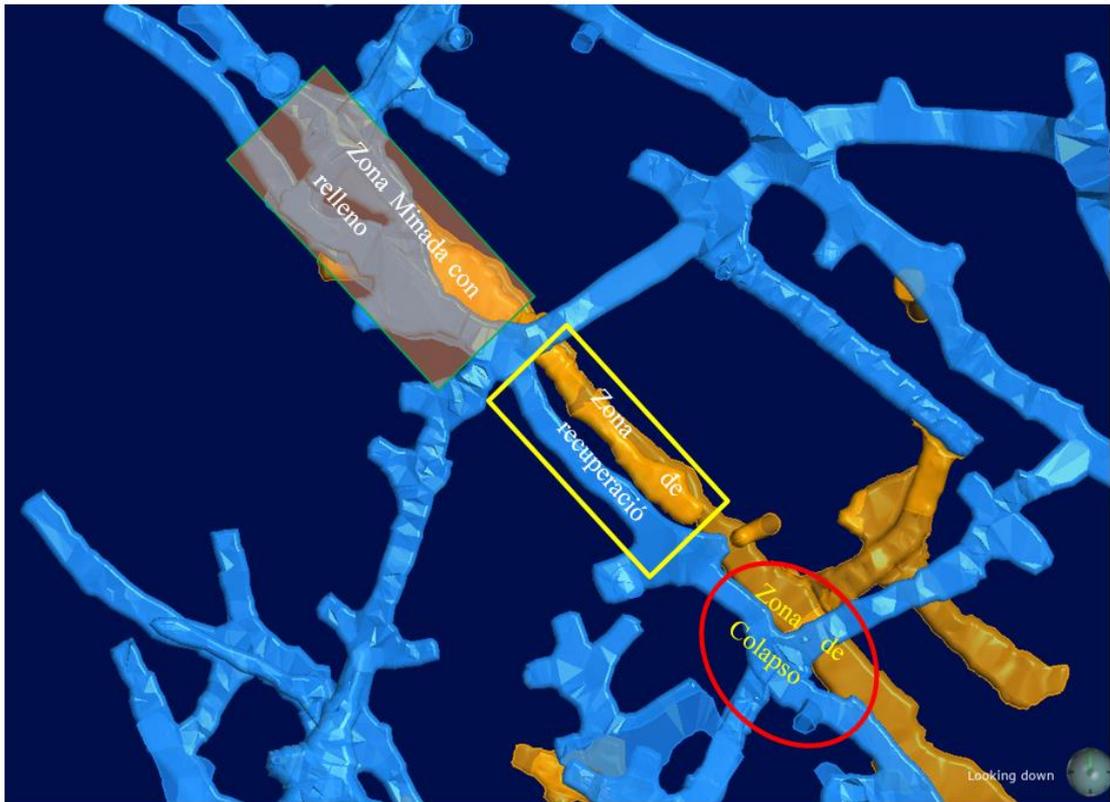


Figura 11. Zonas de delimitación y recuperación de puente del TJ 921

4.3.2 Análisis estereográfico de las discontinuidades

Para establecer características de distribución espacial en discontinuidades estructurales (diaclasas, fallas) que involucran las masas rocosas asociadas a las vetas Clarita y su entorno ha considerado la información estructural (fallas y diaclasas) obtenida en los registros de mapeo geomecánico de la zona de estudio. Estos datos y orientaciones se han procesado estadísticamente empleando la técnica de proyección estereográfica equiángula, utilizando el programa de cómputo DIPS, versión 6.103 de Rocscience. (Ver figura 12)

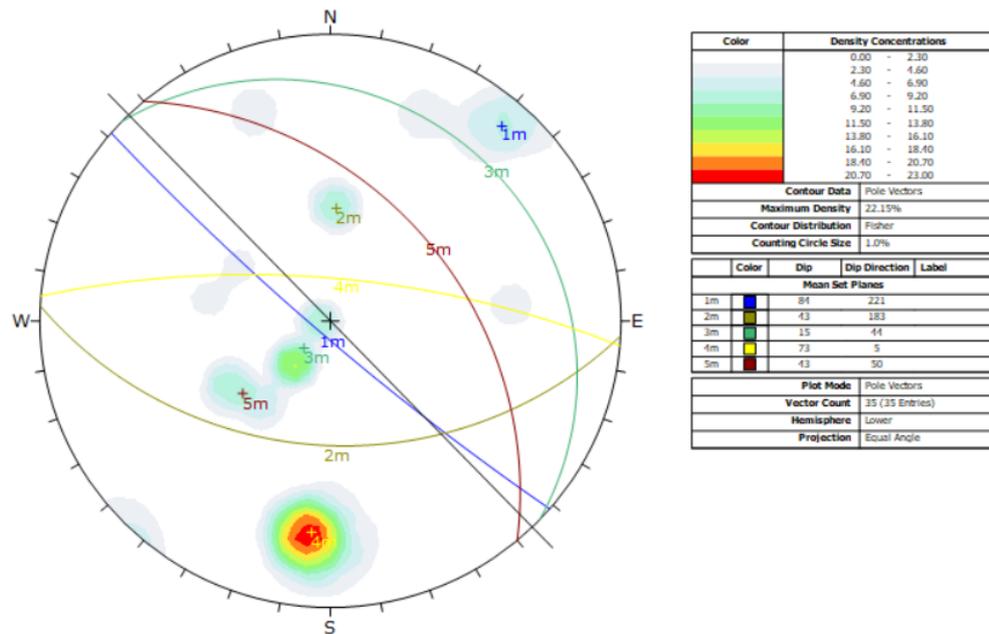


Figura 12. Evaluación estereográfica con DIPS

Luego de realizar el análisis con el programa DIPS, se determinan 5 familias principales:

- Familia 1: 84/221
- Familia 2: 43/183
- Familia 3: 15/44
- Familia 4: 73/5
- Familia 5: 43/50

4.3.3 Propiedades físicas de roca a considerar

➤ Datos a considerar

Para determinar la evaluación geomecánica, se requiere la información como UCS (resistencia a compresión uniáxica), módulo de deformación “Eh” que sirve para realizar el cálculo del esfuerzo principal. Estos datos se recopilan del estudio geomecánico realizado en 2018 por la empresa GEOMECC, el cual se titula “Estudio geomecánico conceptual”. Los siguientes datos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resumen de resistencia a la compresión con martillo Schmidt

ZONA		ADELA	LABOR:	TJ 921	REALIZADO POR:	Ing. Nicolás Gómez Jimenez	
FECHA		3/06/2024	MATERIAL A ESTIMAR:		<input type="checkbox"/> SHOTCRET F	<input checked="" type="checkbox"/> ROCA	
MATRIZ ROCOSA							
FECHA:		*****	P. ESPECIFICO (kN/m ³):		27	LITOLOGIA:	
M ^o		ORIENTACION DEL MARTILLO	REBOTE L	CORRECCION POR ORIENTACION	18 MAYORES	PROMEDIO	RESISTENCIA COMPRESION (MPa)
1			42	-2.7	46	43	105
2			36		44		
3			22		42		
4			26		42		
5			38		42		
6			40		42		
7			38		42		
8			42		42		
9			42		42		
10			40		40		
11			38		40		
12			40		40		
13			40		40		
14			36		40		
15			42		40		
16			42		40		
17			42		40		
18			44		40		
19			42		40		
20			46		40		

Tabla 10. Resumen del ensayo de laboratorio

PROYECTO	RESULTADOS: ENSAYOS DE MECÁNICA DE ROCAS EN LABORATORIOS _ MINA YARUCHAGUA										
	UBICACIÓN DE MUESTRAS		ENSAYO NORMA	PROPIEDADES FÍSICAS	COMPRESIÓN UNIAXIAL	CARGA PUNTUAL	COMPRESIÓN TRIAXIAL			CONSTANTES ELÁSTICAS	
				ASTM-2216-02	ASTM-D2938	ASTM-D5731	ASTM-2664-95			ASTM-D3148	
	PROPIEDADES	γ (KN/m ³)	σ (Mpa)	σ (Mpa)	c (Mpa)	f(°)	mi	E (Gpa)	v (poisson)		
GLSA. 002/18/UMR	Nv.3980, TJ.024NW	Caja Techo	CT	26.74	99.73	-	34.67	45.01	13.00	19.20	0.20
		Veta Clarita	M	43.17	41.36	-	9.44	48.59	20.07	9.39	0.15
		Caja Piso	CP	26.80	52.76	-	11.65	50.48	19.61	11.19	0.15
	Nv.4015, TJ.864SE	Caja Techo	CT	26.80	47.50	-	11.12	48.76	18.08	13.62	0.13
		Veta Yaruchagua	M	27.44	96.00	-	15.84	40.24	8.61	12.88	0.15
		Caja Piso	CP	26.64	162.33	-	17.72	46.53	13.28	20.20	0.18
	Nv.4015	Cx. Chosica-bocamina	A1	-	-	88.78	-	-	-	-	-
	Nv.4015	Caja Techo, Yaruchagua	B-2	-	-	27.25	-	-	-	-	-
	Nv.4015	Caja Piso, Yaruchagua	B-3	-	-	140.34	-	-	-	-	-
	Nv.3980	Cx. Katherinne	R1+140	-	-	43.98	-	-	-	-	-
Cx.Verónica	Verónica	C-1	-	-	9.38	-	-	-	-	-	
Gal. Verónica	Veta Verónica	D-1	-	-	87.32	-	-	-	-	-	

Nota: * Resultados de ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Empresa "Geomecánica Latina S.A."

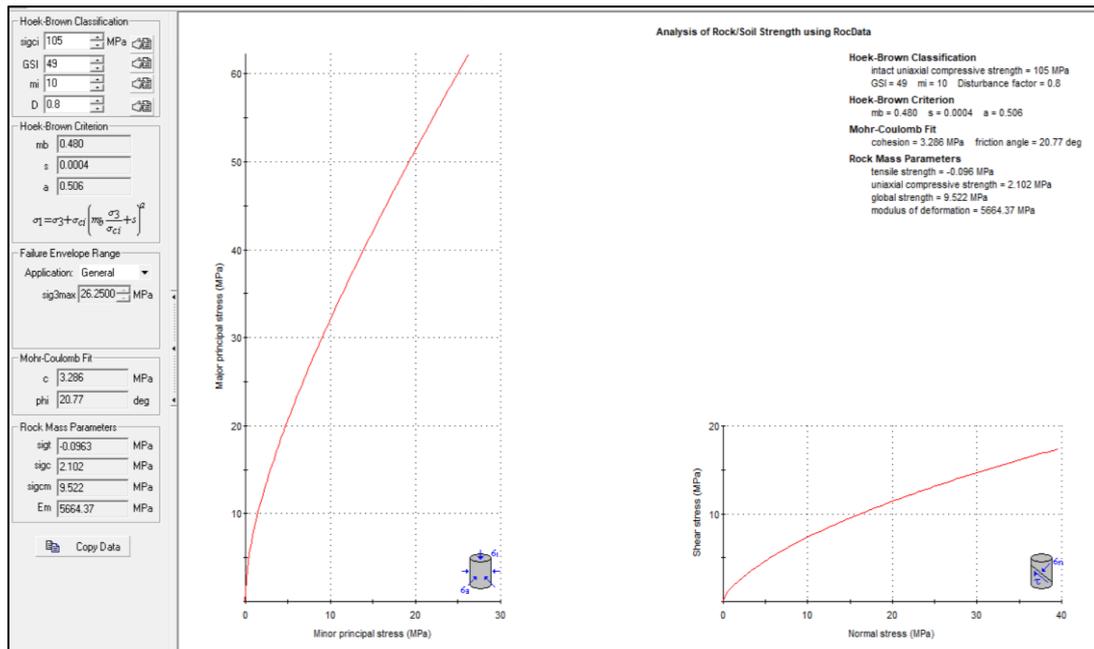


Figura 13. Cuadro de resultados de ensayo de material de relleno

4.3.4 Esfuerzos *in situ*

Se ha estimado el esfuerzo vertical a partir del criterio de carga litostática (Hoek & Brown, 1978), considerando que la explotación llega a profundidades de 120 m. Para la determinación de esfuerzos *in situ*, se utilizará el criterio gravitacional, para lo cual el esfuerzo *in situ* vertical es expresado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_v = \gamma * z$$

Donde:

σ_v = Esfuerzo vertical

z = Es la profundidad

γ = Densidad del material de cobertura

Remplazando valores

$$\sigma_v = 0.027 \times 120$$

$$\sigma_v = 3.24 \text{ MPa}$$

Las determinaciones de los esfuerzos horizontales actuantes son más difíciles de estimar. Normalmente la relación entre el esfuerzo horizontal y el esfuerzo vertical es denotada por la letra k como:

$$\sigma_h = k * \sigma_v$$

Sheorey (1994) desarrollo un modelo de esfuerzos elasto-estático termal de la tierra, (figura 14). Este modelo considera la curvatura de la corteza y la variación de las constantes elásticas,

densidad y un coeficiente de expansión termal de la corteza y el manto de la tierra. Sheorey nos proporciona una ecuación simple que puede ser utilizado para estimar la relación entre el esfuerzo horizontal y vertical k . Esta ecuación es:

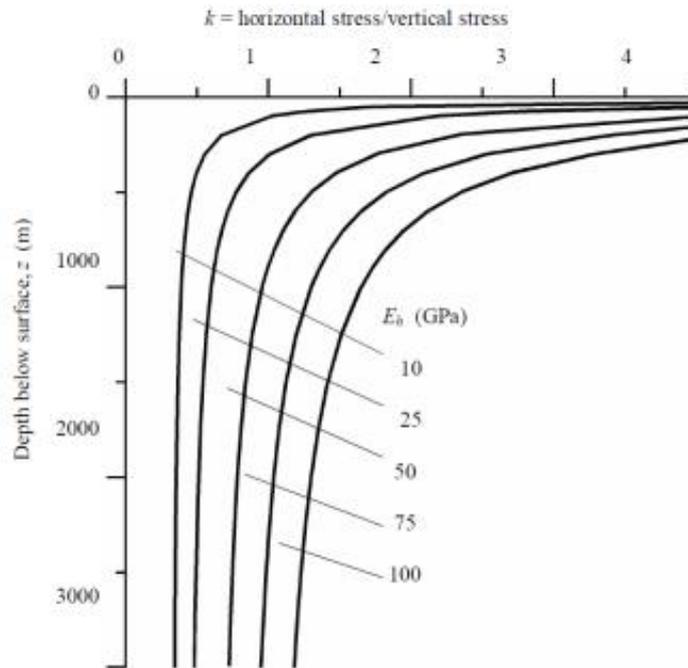


Figura 14. Relación del esfuerzo vertical y horizontal (k) para diferentes módulos de deformación

$$k = 0.25 + 7Eh(0.001 + \frac{1}{z})$$

Donde:

- z (m) = Es la profundidad desde la superficie
- Eh (GPa) = Es el promedio del módulo de deformación del material de cobertura sobre la excavación que es = 9.39 GPa.
- $z = 120$ m.

$$k = 0.25 + 7(9.39)(0.001 + \frac{1}{120})$$

$$k = 0.86$$

Por tanto, el esfuerzo horizontal es:

$$\sigma_h = (0.86) * (3.24)$$

$$\sigma_h = 2.79 \text{ MPa}$$

Según este criterio, el esfuerzo *in situ* vertical para la zona de estudio alcanzaría los 3.24 MPa, estimándose la constante “ k ” (relación de los esfuerzos horizontal / vertical), según el criterio de Sheorey (1994) en 0.86 con ello el esfuerzo horizontal sería de 2.79 MPa.

4.3.5 Análisis de estabilidad

Los resultados de investigaciones geomecánicas desarrolladas advierten posibles inestabilidades locales (a nivel de labores individuales), la mayoría de ellas asociadas a condiciones estructurales que expone la masa rocosa (cuñas formadas por intersección de fallas y diaclasas con los ejes de las excavaciones subterráneas, la sobreexposición de espacios abiertos, falta de relleno en tajeos, esfuerzos inducidos generados por las labores (debilitamiento de pilares por control estructural, vibraciones inducidas por procesos de voladura, que entre otros aspectos generan una disminución progresiva de propiedades resistentes en la masa rocosa y consecuentemente procesos de estabilización de las excavaciones que deben ser evaluadas mediante análisis de estabilidad local.

a) Análisis de estabilidad estructuralmente controlada

Las excavaciones realizadas en masas rocosas, comúnmente, presentan inestabilidades mediante desprendimiento de “cuñas y lajas” desde la corona y/o hastiales de las excavaciones por gravedad y/o deslizamiento. La frecuencia de estos desprendimientos rocosos estará en función a las propiedades resistentes que exponen las discontinuidades estructurales, la masa rocosa, el grado de fracturamiento, las dimensiones de excavación (ancho y altura) y la orientación del eje de excavación respecto a la orientación de los sistemas de discontinuidades estructurales dominantes.

Las cuñas y lajas se forman por la intersección de discontinuidades estructurales (estratificaciones, fallas, diaclasas) en la masa rocosa definiendo múltiples geometrías entrelazadas con restricción de movimiento, cuando se realizan las excavaciones crean caras libres y dejan cuñas expuestas a la superficie de la excavación. Se realizará el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite que se usará con el programa UnWedge 3.0 de Rocscience.

Para realizar la evaluación de formación de cuñas y determinación de esfuerzos de tensión por método de elementos finitos se realiza el análisis en la sección AA. (Figura)

Con el levantamiento del mapeo estructural, se determinan cinco familias principales. Las que se realizarán una evaluación cada 3 familias y tomar los valores que son más críticos para realizar el análisis estructural con el programa Unwedge, se considera la excavación de 3.1 m de ancho por 6.0 m de altura en promedio. (Figura 15 y 16).

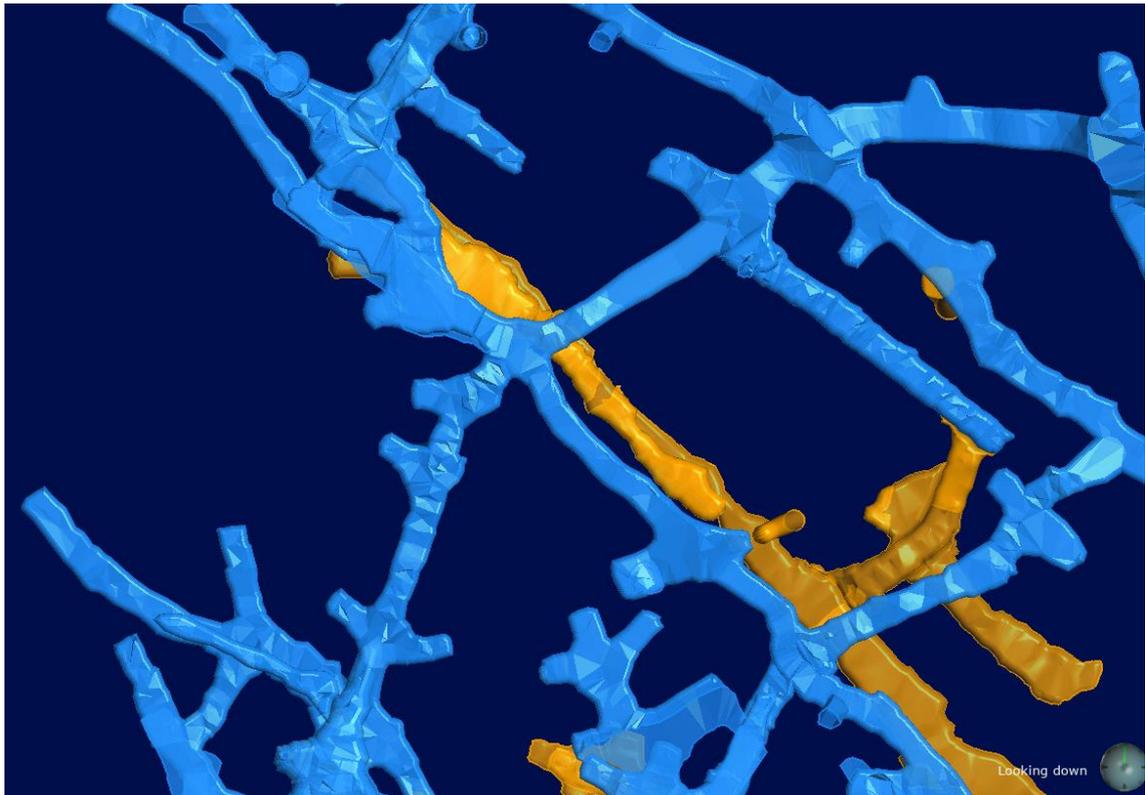


Figura 15 Plano con sección crítica TJ 921

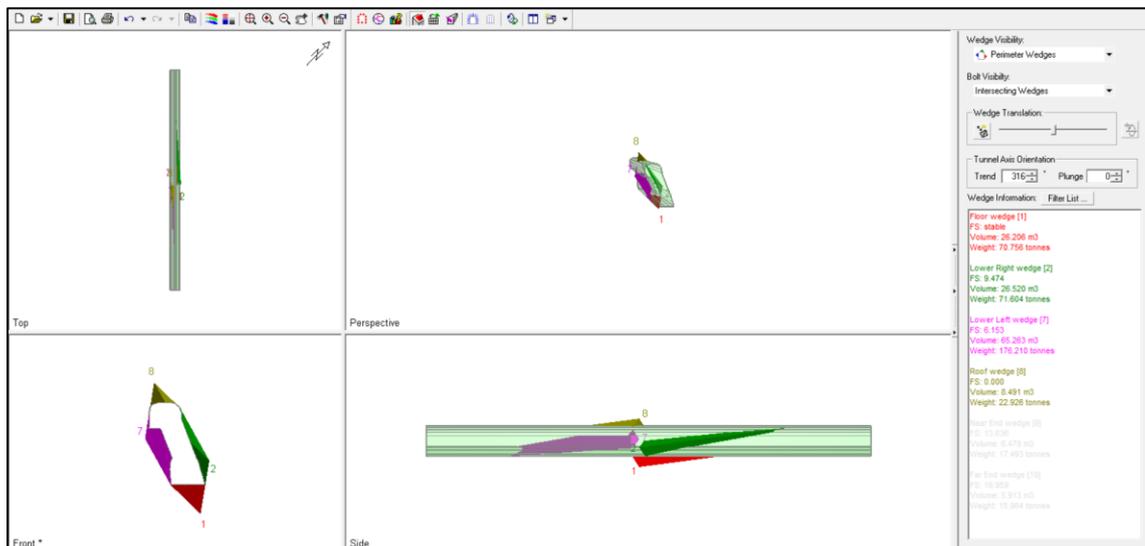


Figura 16 Resultado de análisis con Unwedge

Como se muestra la figura 17, en la caja techo se forma lajas bastante considerables básicamente por la familia de discontinuidad que es paralelo a la labor con buzamiento promedio entre 45 a 70° que define la caja techo y en corona de labor superior formación de cuña con falla por gravedad el cual se controla con sostenimiento con Split set de 5 y/o 7 pies.

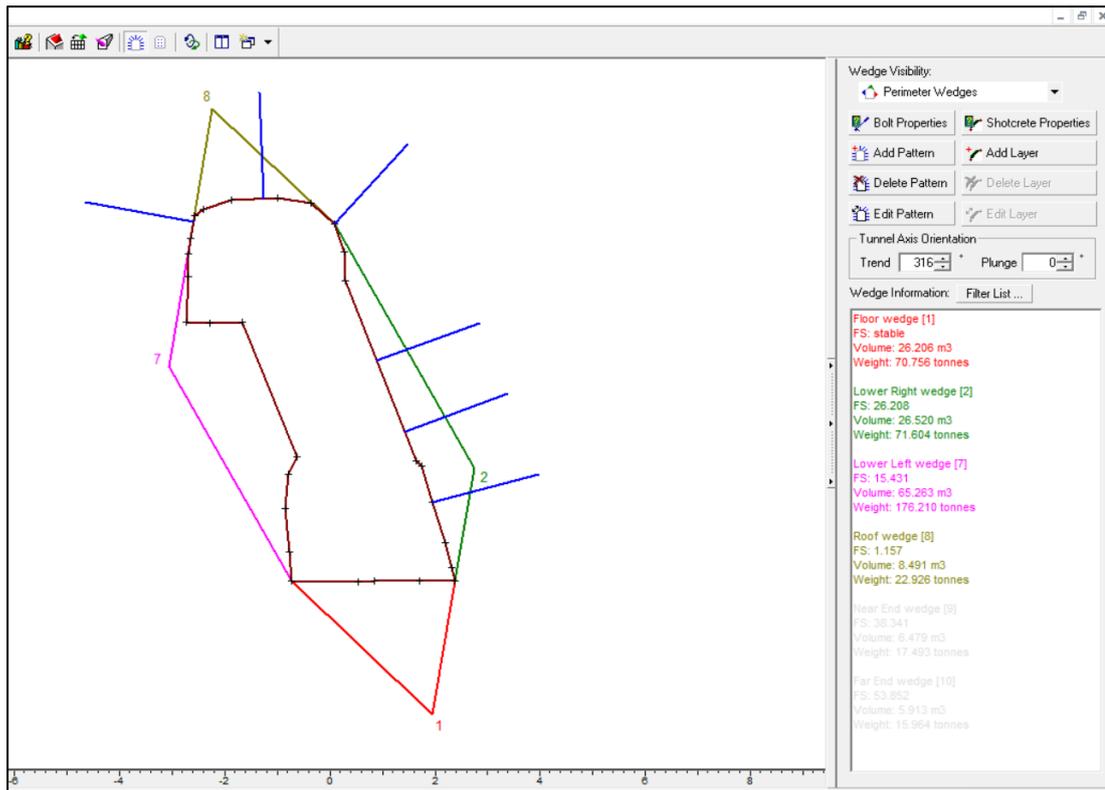


Figura 17. Resultado de análisis con Unwedge con perno split set de 5 y/o 7 pies

Para controlar la estabilidad de formación de lajas y cuñas en caja techo, se debe reforzar con *split set* de 5 y/o 7 pies y relleno en piso para no exponer la caja techo.

b) Análisis de estabilidad debido a esfuerzo

El análisis de estabilidad empleando modelamiento numérico por elementos finitos, se realiza utilizando el Software Phase2, versión 8.024 de Rocscience. Este análisis consiste en simular para determinadas condiciones de calidad de masa rocosa, magnitud y dirección de esfuerzos *in situ*.

Los resultados de este programa muestran simulaciones de distribución de esfuerzos y deformaciones inducidas en el borde de excavaciones expresados como factores de esfuerzo (Resistencia/Esfuerzo máximo). El criterio de estabilidad para resultados de simulaciones mediante modelamiento numérico en las excavaciones subterráneas en las distintas geometrías simuladas es considerar que la relación (Resistencia/Esfuerzo máximo) sea mayor a 1.2, este es un valor mínimo referencial del (Factor de Seguridad) obtenido en los análisis de estabilidad.

Se realiza en análisis con el programa Phase2 en la sección crítica AA, el cual se muestra en la figura 18.

La condición actual en caja techo, puntualmente, se verifica bajo la condición de inestabilidad por los esfuerzos existentes, para eliminar es importante realizar desate de roca desde acceso. (Figura 19).

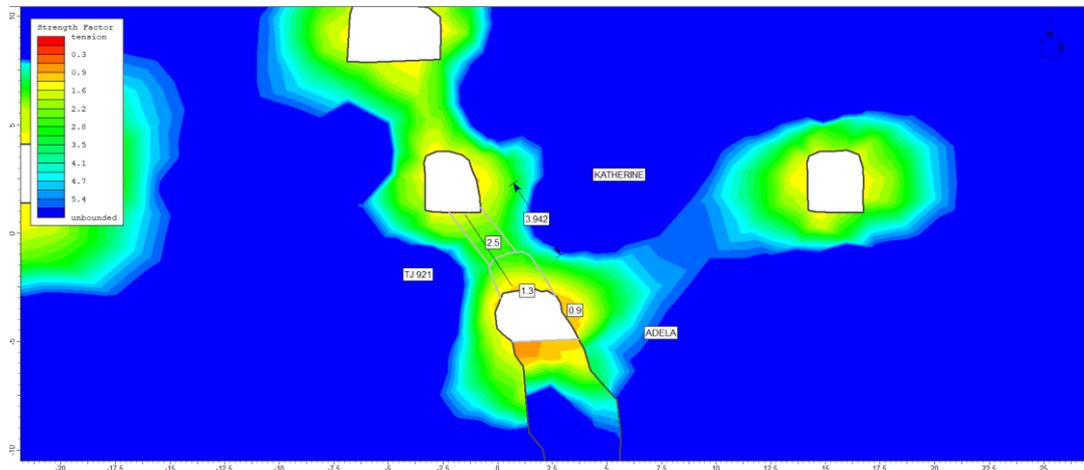


Figura 18. Condición actual de labor

Según plano, se evidencia puente de 3.1 a 3.7 m, lo que se debe corroborar para confirmar. Para recuperar por *breasting* invertido se debe dejar puente de 2.5 m ya que la labor está desfasada con labor superior. Realizando la recuperación y dejando puente de 2.5m la condición de labor se muestra estable tanto en corona y hastiales.

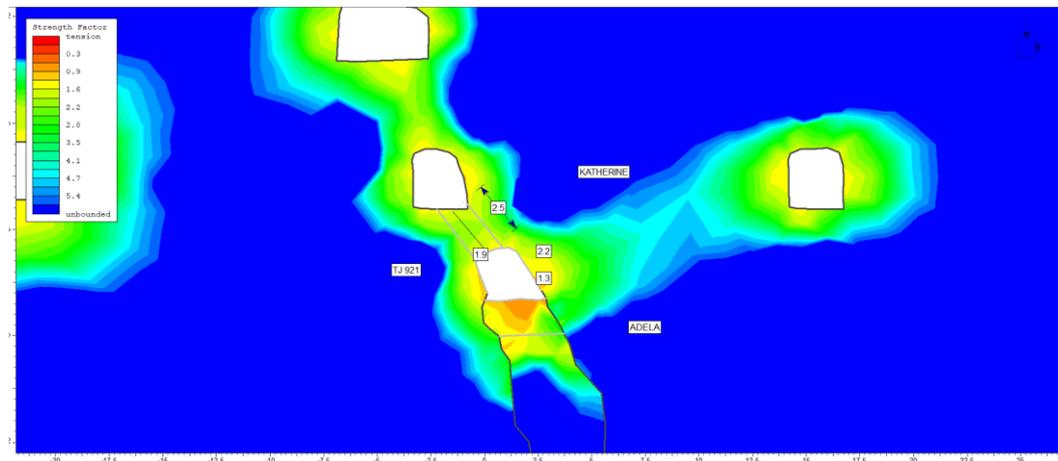


Figura 19. Recuperar puente y dejar 2.5 m

Si se realiza el minado por realce, la labor con altura en promedio de 6.0 m que se muestra en caja techo esfuerzos de tensión; por ende, inestabilidad en un tramo de 2.4 m. Esto indica que no es recomendable realizar o recuperar el puente con realce.

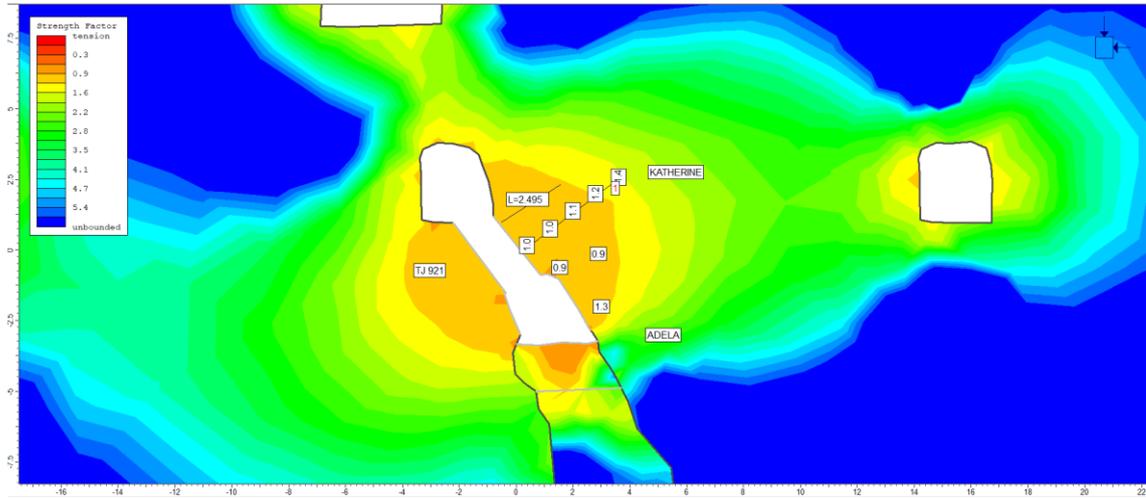


Figura 20. Recuperación de puente por realce genera condición de inestabilidad en caja techo

Lo recomendable es minar o recuperar el puente en *breasting* invertido ya que en caja techo se tiene influencia de inestabilidad de 1.7 m que se debe controlar con split set de 7 pies y dar velocidad al minado. Para esto, se debe rellenar topeado toda el ala del TJ 921 por Adela.

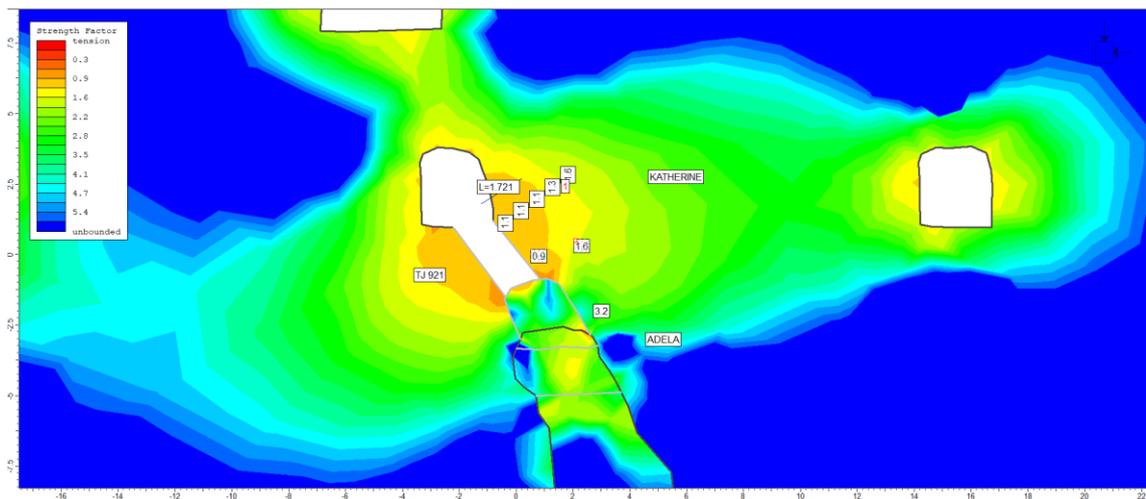


Figura 21. Se debe rellenar topeado y recuperar el puente de 2.5 m

Después de recuperar el puente por *breasting* invertido, se debe rellenar hasta altura de piso y así controlar la caja techo tal como se verifica en la figura, por tal es importante minar y avanzar con relleno no se debe dejar expuesto sin rellenar la labor ya que se relaja la caja techo en el tiempo.

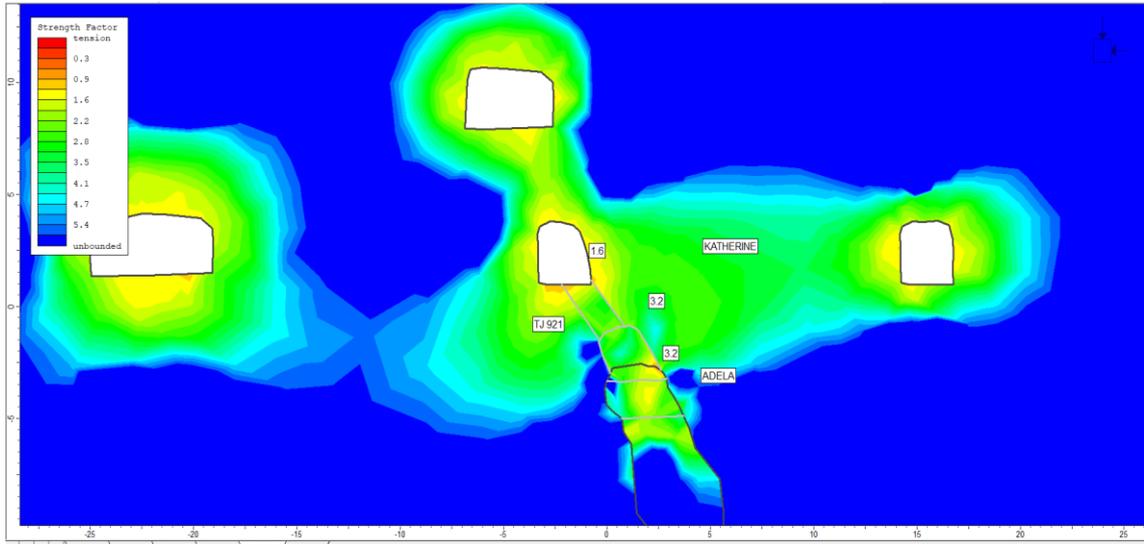


Figura 22. Recuperado el puente de 2.5 m se debe rellenar altura de piso para controlar caja

4.3.6 Prueba en campo pull test

La capacidad mínima requerido para EL SPLIT set de 5 pies es 1pie/t para el split set de 7 pies es 1pie/t, el cual da 5 t y 7 t respectivamente.

Se realizan las pruebas en campo en los diferentes labores y zonas que se vienen trabajando en la actualidad. De igual forma, se realizan los distintos tipos de masa rocosa para verificar las capacidades requeridas.

a) Resumen de prueba de pull test

En el mes de setiembre, se instalan 2350 unidades de split set de 5 pies y 240 de 7 pies, se realiza en total 24 pruebas. Se puede observar el resumen de estos en la tabla 11.

Tabla 11. Resumen de las pruebas con pull test a los split set

N°	Zona	Labor	Tipo de roca	Tipo de perno	Longitud de perno	Desplazamiento	Tonelaje final	Observación
1	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	16.84	5 t	Se deja el elemento
2	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	15.44	5 t	Se deja el elemento
3	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	15.86	5 t	Se deja el elemento
4	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	16.48	5.5 t	Se deja el elemento
5	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	16.28	5 t	Se deja el elemento
6	Santa Ana	Gl. 103	III A	Split Set	5 pies	15.86	5 t	Se deja el elemento
7	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	18.30	5 t	Se deja el elemento
8	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	21.22	4 t	Se deja el elemento
9	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	18.10	3.5 t	Se deja el elemento
10	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	20.02	5 t	Se deja el elemento
11	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	15.82	5 t	Se deja el elemento
12	Santa Ana	Tj. 119	III B/ IV A	Split Set	5 pies	26.40	4.5 t	Se deja el elemento
13	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	16.58	5 t	Se deja el elemento
14	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	16.26	5.5 t	Se deja el elemento
15	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	15.86	5 t	Se deja el elemento
16	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	16.44	5.5 t	Se deja el elemento
17	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	16.46	5 t	Se deja el elemento
18	Santa Ana	Tj. 946	III A	Split Set	5 pies	15.88	5 t	Se deja el elemento
19	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	13.90	5.5 t	Se deja el elemento

20	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	16.28	5 t	Se deja el elemento
21	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	17.26	5.5 t	Se deja el elemento
22	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	16.80	5 t	Se deja el elemento
23	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	18.04	5 t	Se deja el elemento
24	Santa Ana	Gl. 981	III A	Split Set	5 pies	18.54	5.5 t	Se deja el elemento

b) Cuadro de resultados

De las pruebas realizadas, se tienen con resultados en las siguientes estadísticas:

➤ **GL 103**

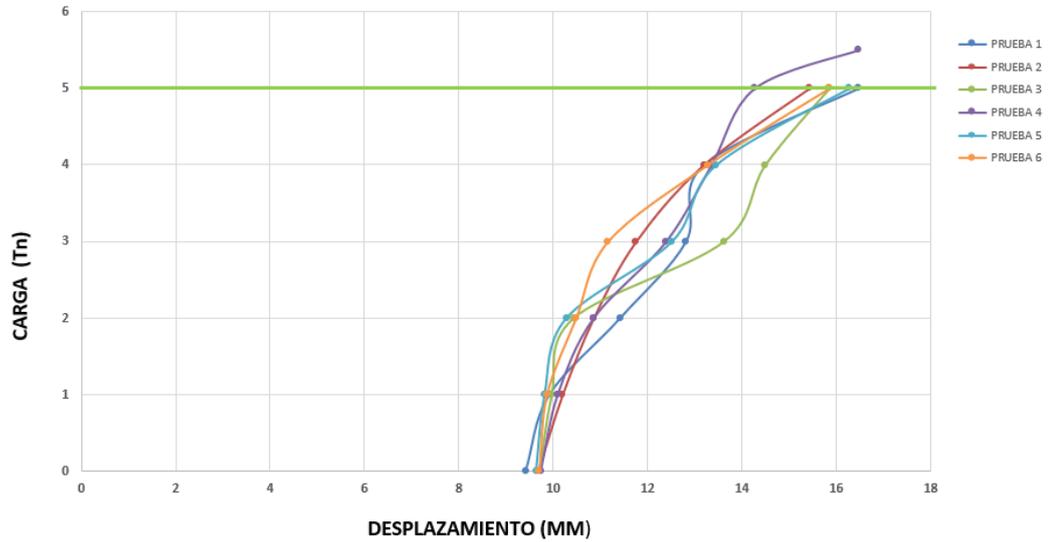


Figura 23. Galería 103 carga (t) versus el desplazamiento (mm)

➤ **TJ 119**

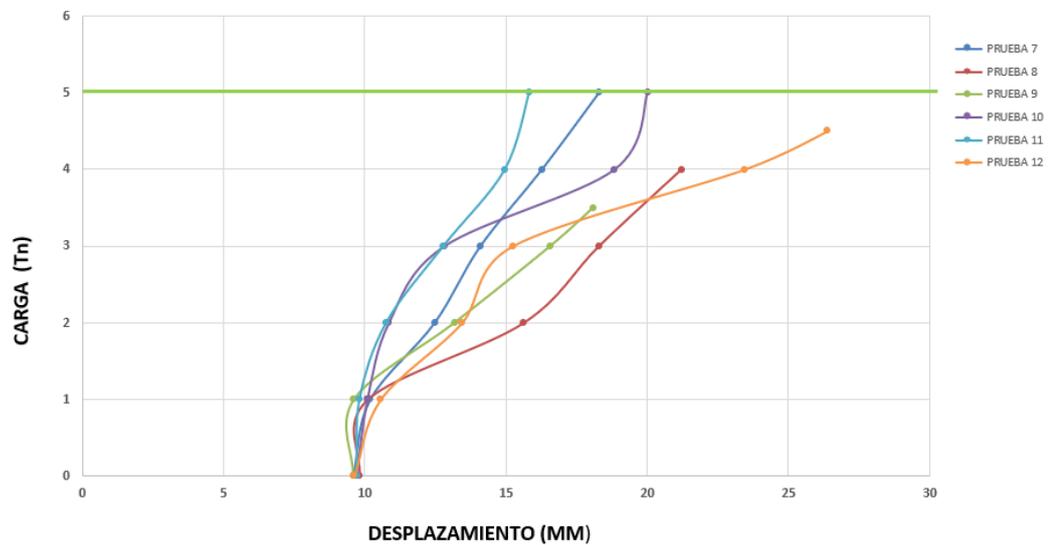


Figura 24. Tajeo 119 carga (t) versus el desplazamiento (mm)

➤ TJ 946

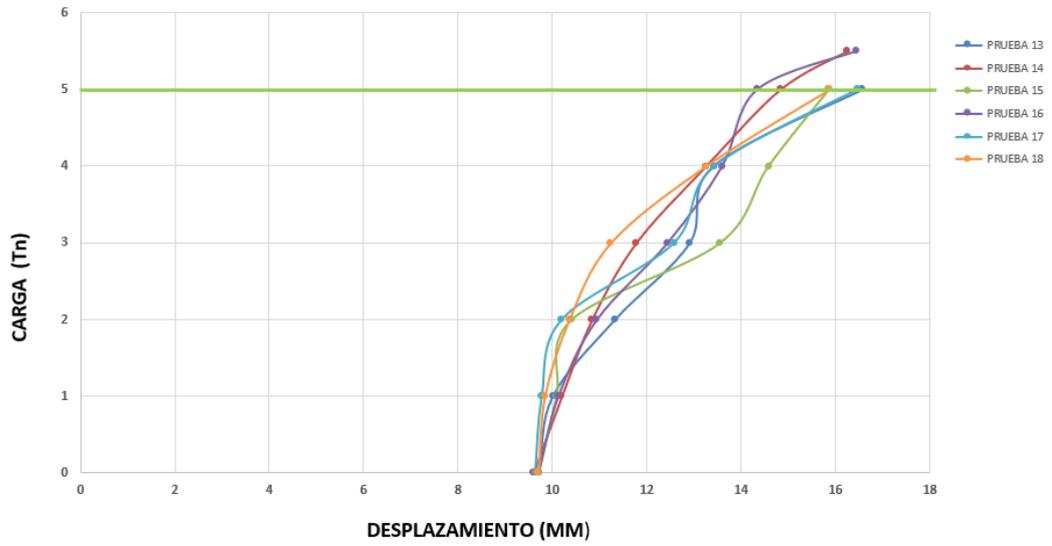


Figura 25. Tajeo 946 carga (t) versus el desplazamiento (mm)

➤ GL 981

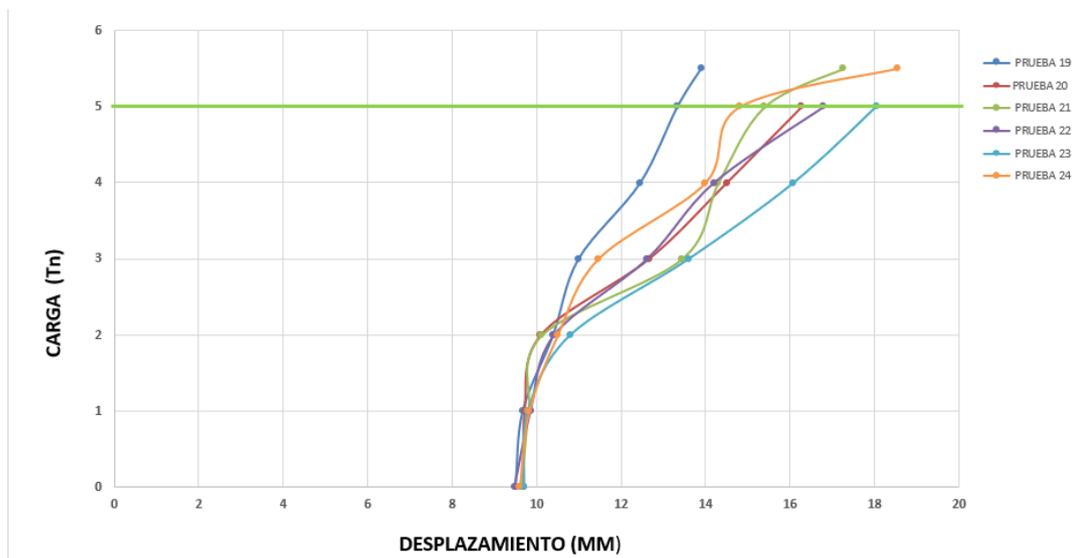


Figura 26. Galería 981 carga (t) versus el desplazamiento (mm)

4.4 Discusión de resultados

H. E. N° 1: La caracterización geomecánica del macizo rocoso permitirá identificar sus propiedades físicas y mecánicas claves, lo que facilitará la selección de los métodos de excavación y sostenimiento más apropiados para la recuperación eficiente y segura del puente mineralizado TJ 921 Adela.

La investigación comprobó, mediante la caracterización geomecánica del macizo rocoso en la zona de estudio, que el RMR es de 51 puntos, la clase de masa rocosa regular (III A) y la resistencia de la roca intacta de 105 MPa. Según el criterio de esfuerzo *in situ*, se determina el esfuerzo vertical de 3.24 MPa, la constante “k” (relación de los esfuerzos horizontal/vertical), según el criterio de Sheorey (1994) es de 0.86, con ello el esfuerzo horizontal es de 2.79 MPa considerando un encampane de 120.0 m. El análisis de estos datos permito contribuir a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.

Según Rodas (1) en su tesis titulada: «Recuperación de puentes mineralizados para incrementar la producción en unidad minera Parcoy de Consorcio Minero Horizonte S.A.», en una de sus conclusiones establece que los estudios geomecánicos realizados en el área mineralizada, utilizando el sistema de evaluación RMR, clasifican el macizo rocoso en categorías de macizos regulares – A, regulares – B, y muy débiles (rellenos) en varios dominios estructurales, con un valor de 55. El momento flector de la madera es de 428 KNm y la resistencia a la compresión de la roca, el mineral y el relleno es de 84, 81 y 5 MPa, respectivamente (1 p. 57).

De ambas investigaciones, se establece que para la recuperación de un puente mineralizado es fundamental efectuar la evaluación geomecánica, cabe resaltar que el Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería estable en su artículo 213, en la ejecución de las labores mineras horizontales, inclinadas o verticales y otras, se procederá a su sostenimiento sistemático inmediato, sobre la base de los estudios geomecánicos, antes de continuar las perforaciones en el frente de avance, aplicando el principio de “labor avanzada, labor sostenida”, en lo que sea aplicable.

En tal sentido se comparte opinión.

H. E. N° 2: El análisis detallado de las discontinuidades y estructuras geológicas que influyen en el macizo rocoso permitirá identificar zonas de mayor inestabilidad, lo que

contribuirá a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.

La investigación verificó, al realizar la evaluación estructural con el programa Dips, que el macizo rocoso está perturbado por la presencia de 3 set de discontinuidades las cuales son: Familia (1) 84/221; Familia (4) 73/5; Familia (5) 43/50 y dos familias secundarias: Familia 2: 43/183; Familia 3: 15/44, por otro lado, aplicando el análisis mediante el método de equilibrio límite con el programa Unwedge, que en el macizo rocoso están 3 familias de discontinuidades lo que permite que se forma cuñas en la corona con falla por gravedad con factor cero y en hastial caja techo laja de gran dimensión este análisis permitió identificar las zonas de mayor inestabilidad, lo que contribuirá a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.

Según Rodríguez (3) en su estudio titulado: «Metodología para recuperar puentes y pilares mediante muros de concreto en el tajo 9910-4, nivel 2995, contrata Divino Jesús, Pataz» en una de sus conclusiones establece que: se evaluó la operación de recuperación de puentes y pilares con muros de concreto en el TJ 9910-4 Nv. 2995, donde inicialmente había 21 pilares naturales. Para construir los pilares artificiales, se identificaron 9 aberturas (V9), con un área total de 1042.99 m², una altura promedio de 5.52 metros y un volumen de 3760.08 m³. La recuperación de pilares se realizó en 7 accesos, destacando el acceso 7 por permitir la recuperación de 11 pilares (3 p. 35).

En tal sentido se comparte opinión que para realizar la recuperación de pilares se debe de buscar y aplicar la metodología que asegure la mayor seguridad.

H. E. N° 3: El establecimiento de un plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, basado en el análisis de estabilidad del macizo rocoso y sus características geomecánicas permitirá optimizar los recursos y reducir los riesgos operacionales, garantizando la viabilidad técnica y económica.

La investigación concluyó que, se estableció en el plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, que el minado se realizará en *breasting*, el cual tiene una influencia directa en la inestabilidad en la caja techo hasta 1.7 m, lo que permite controlar aplicando como sostenimiento los pernos split set de 7 pies. Finalmente, realizada la recuperación del puente se efectúa el rellenando por completo hasta altura de piso logrando estabiliza la labor principalmente la caja techo.

Según Rodríguez (3), en una de sus conclusiones plantea que, además, se verificaron las condiciones geomecánicas y la estabilidad del macizo rocoso al aplicar la metodología, destacando la necesidad de un modelamiento geomecánico y un análisis de estabilidad. Inicialmente, el factor de seguridad fue de 0.95 con un radio plástico máximo de 4.12 metros. A medida que se recuperaban los pilares, el factor de seguridad fluctuó entre 0.95 y 1.26, y el radio plástico aumentó a 10 metros, redistribuyéndose los esfuerzos entre los pilares naturales y artificiales (3 p. 35).

De ambas investigaciones se comparte opinión en el sentido que es necesario apoyarse en metodologías que permitan realizar y calcular los esfuerzos con la finalidad de caracterizar mejor el macizo rocoso y poder recuperar los pilares en forma más segura.

CONCLUSIONES

1. Se verificó que el análisis de estabilidad del macizo rocoso influye positivamente en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela de la unidad minera Yaruchagua, Glore Perú S. A. C. al permitir identificar las condiciones geomecánicas con RMR de 51 clasificándolo como una masa regular (III A), resistencia de la roca intacta de 105 MPa, la familia de discontinuidades más críticas está agrupadas de la siguiente manera: Familia (1) 84/221; Familia (4) 73/5; Familia (5) 43/50, estas son formadores de cunas en corona y lajas en hastiales. El minado se realizará en *breasting*, que tiene una influencia directa en la inestabilidad en la caja techo hasta 1.7 m, lo que permite controlar aplicando como sostenimiento los pernos split set de 7 pies. Finalmente, realizada la recuperación del puente se efectúa el rellenando por completo hasta altura de piso logrando estabiliza la labor principalmente la caja techo.
2. Se comprobó mediante la caracterización geomecánica del macizo rocoso en la zona de estudio que el RMR es de 51 puntos, la clase de masa rocosa regular (III A) y la resistencia de la roca intacta de 105 MPa, según el criterio de esfuerzo in-situ se determina el esfuerzo vertical de 3.24 MPa, la constante “k” (relación de los esfuerzos horizontal/vertical), según el criterio de Sheorey (1994) es de 0.86, con ello el esfuerzo horizontal es de 2.79 MPa considerando un encampane de 120.0 m. El análisis de estos datos permito contribuir a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.
3. Se verificó, al realizar la evaluación estructural con el programa Dips, que el macizo rocoso está perturbado por la presencia de 3 set de discontinuidades las cuales son: Familia (1) 84/221; Familia (4) 73/5; Familia (5) 43/50 y dos familias secundarias: Familia 2: 43/183; Familia 3: 15/44, por otro lado, aplicando el análisis mediante el método de equilibrio límite con el programa UnWedge, que en el macizo rocoso están 3 familias de discontinuidades lo que permite que se forma cuñas en la corona con falla por gravedad con factor cero y en hastial caja techo laja de gran dimensión. Este análisis permitió identificar las zonas de mayor inestabilidad, lo que contribuirá a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.
4. Se estableció en el plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela que el minado se realizará en *breasting*, el cual tiene una influencia directa en la inestabilidad en la caja techo hasta 1.7 m, lo que permite controlar aplicando como sostenimiento los

pernos split set de 7 pies. Finalmente, realizada la recuperación del puente se efectúa el rellenando por completo hasta altura de piso logrando estabiliza la labor principalmente la caja techo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda aplicar un monitoreo continuo de la estabilidad del macizo rocoso para optimizar la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, asegurando la seguridad en la operación. Es fundamental reforzar el sostenimiento con pernos split set de 7 pies en la caja techo, considerando su influencia en la estabilidad hasta 1.7 m. Además, se debe priorizar la correcta clasificación geomecánica (RMR 51) y la gestión de discontinuidades críticas para prevenir fallas estructurales. Finalmente, el relleno completo hasta la altura de piso garantizará la estabilización definitiva de la labor.
2. Se recomienda implementar estrategias de sostenimiento basadas en la caracterización geomecánica del macizo rocoso, considerando su clasificación RMR de 51 (masa regular III A) y su resistencia de 105 MPa. Es fundamental aplicar medidas de control del esfuerzo *in situ*, dado el esfuerzo vertical de 3.24 MPa y el esfuerzo horizontal de 2.79 MPa con una relación k de 0.86 según Sheorey (1994). Asimismo, se debe optimizar el diseño del sostenimiento en función del encampane de 120.0 m para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.
3. Se recomienda implementar un sostenimiento específico basado en la evaluación estructural del macizo rocoso, considerando las tres familias principales de discontinuidades (84/221, 73/5, 43/50) y las dos secundarias (43/183, 15/44). El análisis con UnWedge confirma la formación de cuñas en la corona con falla por gravedad y la presencia de lascas de gran dimensión en el hastial y caja techo, lo que requiere refuerzos estratégicos. Se debe priorizar la estabilización de las zonas más críticas mediante anclajes y refuerzos adecuados para garantizar la seguridad y estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela.
4. Se recomienda ejecutar el plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela con el método de minado *breasting*, considerando su impacto en la estabilidad de la caja techo hasta 1.7 m. Para mitigar riesgos, se deben instalar pernos split set de 7 pies como sostenimiento principal. Además, es esencial completar el relleno hasta la altura de piso tras la recuperación, asegurando la estabilidad definitiva de la labor, especialmente en la caja techo. Un monitoreo continuo garantizará la efectividad del sostenimiento y la seguridad en la operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RODAS, Eliseo. Recuperación de puentes mineralizados para incrementar la producción en unidad minera Parcoy de Consorcio Minero Horizonte S.A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021, 63 pp.
2. CRUZ, Walter y ABANTO, Jayr. Análisis comparativo de los parámetros de entrada q de Barton y RMR de Bieniawski para identificar la dilución de mineral en el macizo rocoso de una empresa minera de Cajamarca 2021. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cajamarca : Universidad Privada del Norte, 2021, 66 pp.
3. RODRIGUEZ, Miguel. Metodología para recuperar puentes y pilares mediante muros de concreto en el tajo 9910-4, nivel 2995, contrata Divino Jesús, Pataz. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo, 2023, 74 pp.
4. PORRAS, Julio. Evaluación geomecánica para la recuperación de puentes con fines de seguridad. Tesis (Maestro en Seguridad y Medio Ambiente en Minería). Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2020, 112 pp.
5. CCORAHUA, Wiliam y ROJAS, Efrain. Geomecánica aplicada a la recuperación de pilares de mineral de la cámara 4, nivel 3075 en la unidad de producción chilcas bajo de la empresa minera Marsa, Parcoy la Libertad-2021. Abancay :Universidad Nacional Micaela Bastidas., 2022, 108 pp.
6. RODAS, Duque. *Manual de geología para ingenieros*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2020.
7. DS 024-2016-EM modificado D.S. N° 023-2017- EM. Reglamento de seguridad y salud ocupacional en la minería. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, 4 de junio de 2024.
8. USTAMANTE, Aquilino. *Geomecánica aplicada en la prevención de pérdidas*. Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, 2013.
9. CUENCA, Helio y MONTANO, Edson. Análisis geomecánico para determinar estabilidad de macizo rocoso de tajeo, método de explotación taladros largos, Pan American Silver Huarón S. A. esis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo : Universidad Continental, 2024, 97 pp.
10. RODRÍGUEZ, Javier. *Caracterización de macizos rocosos* . Facultad de Geología (Petrología y Geoquímica) Universidad de Oviedo. , 2007.
11. ÁREA TECNOLOGIA. Puenes [En línea] [Fecha de consulta: 18 de febrero 2024] <https://www.areatecnologia.com/puentes.htm>.
12. ARKIPLUS. Partes de una galería minera. [En línea] [Fecha de consulta: 18 de febrero 2024] <https://www.arkiplus.com/partes-de-una-galeria-minera>.

13. RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. Mecánica de rocas fundamentos e Ingeniería de Taludes. [En línea] . 2004. [Fecha de consulta: 18 de febrero 2024]
https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf.
14. CÓRDOVA, Nestor. Geomecánica en el minado subterráneo caso mina Condestable. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Lima, Perú : Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.

ANEXOS

Anexo1

Matriz de consistencia

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable
General	¿De qué manera influye el análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela, unidad minera Yaruchagua Glore Perú S.A.C. 2024?	Efectuar el análisis de estabilidad del macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela, unidad minera Yaruchagua Glore Perú S.A.C. 2024	El análisis de estabilidad del macizo rocoso influirá positivamente en la recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela de la Unidad Minera Yaruchagua, Glore Perú S.A.C., al permitir identificar las condiciones geomecánicas críticas y aplicar las técnicas de excavación y sostenimiento más adecuadas, lo que reducirá los riesgos operacionales y optimizará la eficiencia del proceso de recuperación del mineral.	Independiente Análisis de estabilidad del macizo rocoso
Específicos	a) ¿Cuál es el resultado de la caracterización geomecánicamente el macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela?	a) Estimar la caracterización geomecánicamente el macizo rocoso para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela.	a) La caracterización geomecánica del macizo rocoso permitirá identificar sus propiedades físicas y mecánicas clave, lo que facilitará la selección de los métodos de excavación y sostenimiento más apropiados para la recuperación eficiente y segura del puente mineralizado TJ 921 Adela.	Dependiente Puente mineralizado
	b) ¿En qué medida el analizar las discontinuidades y estructuras geológicas influyen para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela?	b) Analizar las discontinuidades y estructuras geológicas que influyen para la recuperación de puente mineralizado TJ 921 Adela.	b) El análisis detallado de las discontinuidades y estructuras geológicas que influyen en el macizo rocoso permitirá identificar zonas de mayor inestabilidad, lo que contribuirá a la implementación de estrategias de sostenimiento específicas para garantizar la estabilidad del puente mineralizado TJ 921 Adela durante su recuperación.	
	c) ¿Cuál es el plan de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela?	c) Establecer el plan de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela.	c) El establecimiento de un plan integral de recuperación del puente mineralizado TJ 921 Adela, basado en el análisis de estabilidad del macizo rocoso y sus características geomecánicas, permitirá optimizar los recursos y reducir los riesgos operacionales, garantizando la viabilidad técnica y económica.	

Anexo2

Operacionalización de variables

Variable (s)	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente Análisis de estabilidad del macizo rocoso	Se refiere al proceso de evaluación y comprensión de las condiciones geomecánicas de un macizo rocoso, con el objetivo de determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales. Este análisis implica la identificación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo, así como el estudio de las discontinuidades, estructuras geológicas y el impacto de factores externos (como la presión del agua o el clima) que pueden afectar su estabilidad. Un análisis adecuado es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras, especialmente en la recuperación de recursos minerales.	El análisis de estabilidad del macizo rocoso es un proceso técnico que evalúa la capacidad de un macizo rocoso para soportar cargas y fuerzas sin fallar o colapsar. Este análisis implica el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, así como la identificación de factores geológicos, estructurales y ambientales que pueden afectar su comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso. • Evaluación de las discontinuidades y estructuras geológicas. • Plan de recuperación del puente mineralizado. plan de recuperación del puente mineralizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • (RMR o Q de Barton) • Densidad de fracturamiento • Tasa de recuperación del mineral (%)
Dependiente Puente mineralizado	Se refiere al proceso de evaluación y comprensión de las condiciones geomecánicas de un macizo rocoso, con el objetivo de determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales. Este análisis implica la identificación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo, así como el estudio de las discontinuidades, estructuras geológicas y el impacto de factores externos (como la presión del agua o el clima) que pueden afectar su estabilidad. Un análisis adecuado es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia en operaciones mineras, especialmente en la recuperación de recursos minerales	Puente mineralizado se refiere a una sección específica de un yacimiento mineral donde hay una concentración notable de minerales valiosos, que está parcialmente rodeada por rocas no mineralizadas. Este término se utiliza comúnmente en la minería subterránea para describir áreas que actúan como un nexo o conexión entre diferentes cuerpos mineralizados o entre el mineral y el entorno geológico	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación geológica. • Diseño del plan de minería. • Implementación de métodos de extracción. • Monitoreo y control de estabilidad. • Transporte y procesamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de precisión en la estimación de reservas minerales • Tasa de cumplimiento del cronograma de producción (%) • Eficiencia del método de extracción (%) • Factor de seguridad (FS) • Costo por tonelada transportada y procesada (\$/t)