Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Diseño de secuencia de minado con rib y sill pillar para recuperación de veta Angela NE en una unidad minera del sur del Perú

Tesis presentada por:

Bautista Sutta, Anderw Anderson

ORCID: 0009-0000-6911-6632

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Montesinos Solorzano, Cesar Gerardo

ORCID: 0009-0001-8007-7862

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Octubre del 2026

Dictamen: 018877-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018877, presentado por:

2015203791 - BAUTISTA SUTTA ANDERW ANDERSON

Titulado:

DISEÑO DE SECUENCIA DE MINADO CON RIB Y SILL PILLAR PARA RECUPERACIÓN DE VETA ANGELA NE EN UNA UNIDAD MINERA DEL SUR DEL PERÚ

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR



40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR



70360439 - PAZ ZEVALLOS CRISTIAN ZENON
DICTAMINADOR



Diseño de secuencia de minado con rib y sill pillar para recuperación de veta Angela NE en una unidad minera del sur del Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%	6%	2%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	3%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%
5	vdocumento.com Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	pure.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%
10	tesis.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	1library.co Fuente de Internet	<1%
12	vnexplorer.net Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
14	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%

DEDICATORIA

A mi madre, Marilú, por el amor y paciencia incondicional que tuvo en todo este proceso de mi formación. Por ser mi ejemplo y mi heroína en toda mi vida, mi pilar que me guio y orientó por el buen camino. Por su dedicación y valentía que es una inspiración constante en mi vida

A mi padre, Miguel, por ser el soporte de mi familia, por darme el cariño desinteresado y apoyo infinito por verme crecer tanto profesionalmente como personalmente. Por enseñarme el valor del esfuerzo y tener la plena confianza de mis capacidades

A mis hermanos, Leonel y Emilio, por su eterno e inmenso apoyo moral en todo este proceso, sus ánimos silenciosos que estaban muy presentes a su vez. Su amor y paciencia pura

Finalmente, a mi abuelo, Hipólito, por sus enseñanzas desde que fui niño, por mostrarme lo maravilloso que puede ser el mundo minero, por enseñarme humildad, sabiduría, paciencia, por mostrarme la realidad que vive nuestro país y darme una lección de vida, y por darme esas virtudes que, hoy marcan mi vida y muestran la clase de persona que soy hoy en día.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por ser la guía en todas las decisiones que pasé, por ser mi soporte en mis buenos y malos momentos, por darme la salud necesaria y todas las oportunidades que hizo que cruzaran por mi vida, en muchos momentos difíciles encontré refugio y fe necesaria para que pueda seguir adelante y llegar a este logro académico.

A mis padres, Marilú y Miguel, por ser mi soporte económica y moral, porque desde el primer día creyeron en mi y, aún lo siguen haciendo. Trabajaron para que pueda cumplir mis metas y siempre dieron todo para que pueda cumplir mis objetivos.

A mi casa de estudios, por ser pilar fundamental en mis conocimientos, por darme el espacio donde pude adquirir no solo conocimiento, sino establecer mis actuales círculos sociales y mi formación como una persona con ética y moral social.

EPÍGRAFE

"Tienes que darte el permiso de fallar. Todas mis malas ideas son las que, después, me han llevado a las buenas".

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento geomecánico del rib pillar y sill pillar para determinar una secuencia de minado segura y técnicamente viable durante la recuperación del puente mineralizado de la veta Ángela NE, en una unidad minera del sur del Perú.

Se desarrolló una investigación aplicada, de enfoque principalmente cuantitativo, diseño no experimental y nivel descriptivo y explicativo, centrada en el subnivel 9863. La metodología comprendió el análisis de las condiciones geológicas, estructurales e hidrogeológicas, la caracterización del macizo rocoso, la evaluación de registros de convergencia y el modelamiento numérico mediante el método de elementos de contorno. Se compararon tres escenarios con longitudes de excavación sin apoyo (SPAN) de 6, 8 y 10 m, considerando un rib pillar de 1 m y un sill pillar de 0.5 m. Los resultados evidenciaron condiciones desfavorables asociadas a fallas en la caja techo, roca de calidad IV A y IV B, presencia de agua y velocidades de deformación de hasta 6 mm/día hacia el ala norte.

El escenario de 6 m presentó entre 75% y 85% del área de la losa en condición estable, mientras que los escenarios de 8 y 10 m alcanzaron porcentajes de inestabilidad de entre 60% y 87%, y entre 83% y 92%, respectivamente. Se determinó que el SPAN de 6 m constituye la alternativa más favorable entre las evaluadas, complementada con la conservación de los pilares, el refuerzo del sostenimiento, el monitoreo geomecánico y la colocación de relleno en pasta antes de las 12 horas posteriores al minado.

Palabras clave: Geomecánica, secuencia de minado, pilares.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the geomechanical behavior of the rib pillar and sill pillar to determine a safe and technically feasible mining sequence for recovering the mineralized crown pillar of the Ángela NE vein at a mining operation in southern Peru.

The study adopted an applied, primarily quantitative approach, with a non-experimental design and a descriptive and explanatory scope, focusing on sublevel 9863. The methodology included analyzing geological, structural, and hydrogeological conditions, characterizing the rock mass, evaluating convergence records, and conducting numerical modeling using the boundary element method. Three scenarios with unsupported excavation spans (SPAN) of 6, 8, and 10 m were compared, considering a 1 m rib pillar and a 0.5 m sill pillar. The results revealed unfavorable conditions associated with hanging-wall faults, rock mass quality classes IV A and IV B, water presence, and deformation rates of up to 6 mm/day toward the northern wing.

The 6 m scenario showed stable conditions across 75% to 85% of the slab area, whereas the 8 m and 10 m scenarios exhibited instability across 60% to 87% and 83% to 92% of the area, respectively. The 6 m span was identified as the most favorable alternative among those evaluated, complemented by pillar retention, reinforcement of ground support, geomechanical monitoring, and paste backfilling within 12 hours of mining.

Keywords: Geomechanics, mining sequence, pillars.

ÍNDICE

DEDICATORIA
AGRADECIMIENTOS
EPÍGRAFE
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN 1
CAPITULO I 3
1. Planteamiento del problema 4
1.1 Determinación del problema 4
1.2 Objetivo del proyecto 5
1.2.1 Objetivo general 5
1.2.2 Objetivos específicos 6
1.3 Pregunta de investigación 6
1.3.1 Pregunta principal 6
1.3.2 Preguntas especificas 7
1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema 7
1.5 Palabra clave 7
1.6 Justificación e importancia 8
CAPÍTULO II 9
2. Fundamento teórico 10
2.1 Estado del arte 10
2.1.1 Antecedentes de la investigación 10
2.2 Bases teóricas del proyecto 15
2.3 Hipótesis 15
2.3.1 Variable dependiente 16
2.3.2 Variable independiente 16
CAPÍTULO III 18
3. ALCANCES Y LIMITACIONES 19
3.1 Alcances y limitaciones 19
3.2 Tipo y nivel de investigación 21
3.2.1 Tipo de investigación 21
3.2.2 Nivel de investigación 22
3.3 Población y muestra 22
3.3.1 Población 22

3.3.2 Muestra 23
3.4 Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos 24
3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos 24
3.4.2 Técnicas de recolección de datos 26
3.4.3 Instrumentos de medición 27
3.4.4 Plan de análisis estadístico de los datos 28
3.5 Lugar de desarrollo de investigación 30
3.6 Ambiente que utilizar 31
3.6.1 Ubicación de la zona de estudio 31
3.6.2 Información técnica de zona de recuperación veta Angela 32
3.7 Secciones geológicas 34
3.8 Secciones topográficas 39
3.9 Planos geomecánicos 42
3.10 Análisis técnico de factores influyentes 44
3.10.1 Afluencia y presión de drenaje de agua 44
3.10.2 Eventos de inestabilidad 46
3.10.3 Condición estructural 49
3.10.4 Condición de deformación 54
3.10.5 Resumen de análisis 57
3.10.6 Zonificación Geomecánica 58
3.10.7 Modelamiento de elementos de contorno 61
3.10.8 Escenario 01 – SPAN 06 m 62
3.10.9 Escenario 02 – SPAN 08 m 72
3.10.10 Escenario 03 – SPAN 10 m 79
3.10.11 Resumen interpretación de escenario 01 86
3.10.12 Resumen interpretación de escenario 02 88
3.10.13 Resumen interpretación de escenario 03 89
CAPÍTULO IV 91
4. RESULTADOS 92
RECOMENDACIONES 94
REFERENCIAS 99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables....17
Tabla 2 Secuencionamiento global SN 9863 65
Tabla 3 Secuencionamiento global SN 9863 68
Tabla 4 Secuencionamiento global SN 9863 71
Tabla 5 Secuencionamiento global SN 9863 75
Tabla 6 Secuencionamiento global SN 9863 78
Tabla 7 Secuencionamiento global SN 9863 82
Tabla 8 Secuencionamiento global SN 9863 85
Tabla 9 Resumen interpretación de escenario 01 86
Tabla 10 Resumen interpretación de escenario 02 88
Tabla 11 Resumen interpretación de escenario 03 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista este – oeste veta Ángela NE 32
Figura 2 Vista en planta veta Ángela NE 33
Figura 3 Vista sur - norte veta Ángela NE 34
Figura 4 Sección transversal SN 9863 NE ST200 35
Figura 5 Sección transversal SN 9863 NE ST260 NE 36
Figura 6 Sección transversal SN 9863 NE ST 300 37
Figura 7 Sección transversal S + 80 SW 39
Figura 8 Sección transversal F+0 40
Figura 9 Sección transversal F+40 41
Figura 10 Plano geomecánico NV 4180 TJ 9863 SW 42
Figura 11 Plano geomecánico NV 4180 TJ 9864 SW 43
Figura 12 Vista longitudinal de drenaje de agua en veta Ángela NE 44
Figura 13 Vista en planta de drenaje de agua en veta Ángela NE 44
Figura 14 Estadística de drenaje de agua en veta Ángela NE 45
Figura 15 Goteo leve a continúo 45
Figura 16 Vista longitudinal de eventos de inestabilidad en veta Ángela NE 46
Figura 17 Vista en planta de eventos de inestabilidad en veta Ángela NE 46
Figura 18 Estadística de eventos de inestabilidad 47
Figura 19 Condición de riesgo N y S 48
Figura 20 Condición de estabilidad N y S 48
Figura 21 Fisuramiento de concreto 49
Figura 22 Vista longitudinal de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE 50
Figura 23 Vista en planta de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE 50
Figura 24 Isovalores por buzamiento de discontinuidad en veta Ángela NE 51
Figura 25 Estadística de orientación y buzamiento de discontinuidades en veta Ángela NE 51
Figura 26 Isovalores de discontinuidad en CT 52
Figura 27 Isovalores de discontinuidad en CP 52
Figura 28 Isovalores de discontinuidad con alta influencia de fallas 53
Figura 29 Análisis de convergencia (mm) 54
Figura 30 Análisis de velocidad (mm/ día) 55
Figura 31 Análisis de aceleración 56
Figura 32 Convergencia punto A-B-C 57

Figura 33 Velocidad punto A-B-C 57
Figura 34 Aceleración punto A-B-C 58
Figura 35 Zonificación caja techo 59
Figura 36 Zonificación caja piso 59
Figura 37 Vista en planta de zonificación RMR en veta Ángela NE 60
Figura 38 Estadística de la zonificación RMR en veta Ángela NE 60
Figura 39 Zonificación RMR en veta Ángela S y N 61
Figura 40 Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 01 62
Figura 41 Análisis de modelamiento en grilla longitudinal esfuerzo sigma 1 y sigma 3 63
Figura 42 Análisis de modelamiento en grilla longitudinal factor de esfuerzo - seguridad 64
Figura 44 Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta 66
Figura 45 Grilla transversal, planta - Factor de seguridad 67
Figura 47 Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta 69
Figura 48 Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad 70
Figura 50 Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 02 72
Figura 51 Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta 73
Figura 52 Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad 74
Figura 54 Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta 76
Figura 55 Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad 77
Figura 57 Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 03 79
Figura 58 Análisis de modelamiento en grilla longitudinal 80
Figura 59 Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad 81
Figura 61 Interpretación de modelamiento en grilla transversal y planta 83
Figura 62 Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad 84
Figura 64 NV 4180 TJ 9863 SW Tramos a reforzar veta Angela NE 94
Figura 65 NV 4180 TJ 9863 SW Tramos a percutar veta Angela NE 95
Figura 66 Instalación de cable bolting 96
Figura 67 SPAN y RIB PILLAR 96
Figura 68 SILL y RIB PILLAR 97

INTRODUCCIÓN

La recuperación de pilares mineralizados en minería subterránea representa un desafío técnico debido a los cambios que la extracción genera en la distribución de esfuerzos y en la estabilidad de las excavaciones. Estos procesos adquieren especial relevancia cuando se desarrollan en macizos rocosos de baja calidad, con presencia de fallas, discontinuidades y agua. En estas condiciones, el diseño de la secuencia de minado requiere integrar la caracterización geomecánica del terreno con la evaluación del comportamiento de los pilares, el sostenimiento y el relleno, a fin de establecer parámetros de explotación compatibles con las condiciones del yacimiento.

La presente investigación se desarrolla en la veta Ángela NE, perteneciente a una unidad minera del sur del Perú, y se centra en la recuperación del puente mineralizado del subnivel 9863. Este sector presenta condiciones geológicas y geomecánicas complejas, entre las que destacan la geometría irregular de la veta, la presencia de zonas de falla en la caja techo, la variabilidad de la calidad del macizo rocoso y el drenaje de agua asociado a las estructuras existentes. Asimismo, los registros de convergencia y las evidencias de deterioro del sostenimiento muestran procesos de deformación y relajamiento que deben considerarse al definir el orden y las dimensiones de las excavaciones.

Frente a esta problemática, resulta necesario evaluar la función del rib pillar y del sill pillar durante la recuperación del mineral. La conservación de estos elementos forma parte de las medidas de control geomecánico propuestas para limitar la exposición de sectores desfavorables y atenuar los efectos del minado sobre las zonas adyacentes. Sin embargo, su desempeño debe analizarse conjuntamente con la longitud de excavación sin apoyo, denominada SPAN, la

secuencia de extracción y el tiempo de colocación del relleno. La evaluación integrada de estos parámetros permite sustentar las decisiones operativas y reconocer las restricciones que requiere la recuperación del puente mineralizado.

El objetivo de la investigación es evaluar geomecánicamente el comportamiento del rib pillar y del sill pillar para determinar una secuencia de minado segura y técnicamente viable. Para ello, se analizan las condiciones geológicas, estructurales e hidrogeológicas del sector, la clasificación del macizo rocoso, los eventos de inestabilidad y las mediciones de convergencia. Esta información se complementa con el modelamiento numérico mediante el método de elementos de contorno, comparando escenarios con SPAN de 6, 8 y 10 m, y considerando un rib pillar de 1 m y un sill pillar de 0.5 m. La comparación comprende los esfuerzos inducidos, los factores de seguridad y los halos de influencia asociados a cada alternativa.

El estudio corresponde a una investigación aplicada, de enfoque principalmente cuantitativo, diseño no experimental y alcance descriptivo y explicativo. Su aporte consiste en establecer criterios técnicos para orientar la recuperación del mineral en el sector evaluado, integrando el diseño de pilares, el refuerzo del sostenimiento, el monitoreo geomecánico y la colocación oportuna del relleno en pasta. De esta manera, la investigación proporciona una base para la planificación del minado y el control de la inestabilidad, cuya aplicación debe acompañarse de la verificación continua de las condiciones observadas en campo.

CAPITULO I

1. Planteamiento del problema

1.1 Determinación del problema

La recuperación de pilares en minería subterránea constituye una actividad de alta complejidad geomecánica, debido a que implica intervenir zonas previamente explotadas, con redistribución de esfuerzos, presencia de labores cercanas, relleno cementado, discontinuidades estructurales y posibles condiciones de inestabilidad del macizo rocoso. En este contexto, la Unidad al sur del Peru presenta la necesidad de evaluar técnicamente la recuperación de la veta Ángela NE, considerando el comportamiento del rib pillar y sill pillar durante la secuencia de minado.

La veta Ángela NE ha sido objeto de evaluaciones geomecánicas previas; sin embargo, las condiciones actuales del macizo rocoso, la geometría de la veta y los factores influyentes han variado con el avance de las labores mineras. La presente investigación señala que la zona presenta nuevas condiciones geológicas y de comportamiento del macizo rocoso, lo que exige actualizar los parámetros técnicos de diseño para establecer una secuencia de minado segura y operativamente viable.

Uno de los principales problemas identificados corresponde a la presencia de zonas de falla en la caja techo, con potencias mayores a 1.5 m, además de una geometría sinuosa e irregular de la veta. Estas condiciones generan incertidumbre respecto a la estabilidad de la excavación durante la recuperación del puente mineralizado, especialmente en sectores donde la calidad del macizo rocoso varía entre roca tipo IVA, IVB y V.

Asimismo, la veta Ángela NE presenta factores influyentes que incrementan el riesgo geomecánicos, tales como drenaje de agua, eventos de inestabilidad, deformaciones progresivas,

presencia de discontinuidades persistentes y relajamiento del macizo rocoso. La investigación a registrado eventos asociados a placas de pernos hundidas, mallas sobrecargadas, fisuramiento prematuro de concreto y zonas con condición de equilibrio límite, lo que evidencia la necesidad de establecer criterios técnicos adecuados antes de ejecutar la recuperación del pilar.

Adicionalmente, los análisis de convergencia indican valores cercanos a -15 mm en zonas próximas a la recuperación, mientras que la velocidad de deformación puede alcanzar hasta 6 mm/día hacia el ala norte, condición considerada de riesgo. Esta situación demuestra que la recuperación de la veta debe ser evaluada mediante herramientas de análisis geomecánicos y modelamiento numérico, a fin de determinar el comportamiento de la losa, el puente, el rib pillar y el sill pillar bajo distintos escenarios de minado.

En este sentido, el problema central de la investigación radica en la necesidad de determinar una secuencia de minado segura para la recuperación de la veta Ángela NE, evaluando el comportamiento geomecánicos del rib pillar y sill pillar, así como la influencia de los parámetros de SPAN, factor de seguridad, esfuerzos inducidos y deformaciones del macizo rocoso. Esta evaluación permitirá reducir el riesgo de inestabilidad, optimizar la recuperación del mineral y garantizar condiciones seguras durante la explotación.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Evaluar geomecánicamente el comportamiento del Rib pillar y Sill pillar durante la recuperación de la veta Ángela NE en unidad minera al sur del Perú, mediante el análisis de factores geológicos, estructurales, hidrogeológicos, deformaciones y modelamiento numérico, con el propósito de determinar una secuencia de minado segura y técnicamente viable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la secuencia de minado óptima, así como sus respectivas restricciones relacionadas al cálculo de SPAN y TAS al momento de la recuperación del puente; siendo la primera prueba a ejecutarse con esta estructura (relleno cementado – detrítico) donde tanto la potencia de relleno cementado, así como el refuerzo del relleno en pasta usado en veta Ángela difiere del actual minado.
- Analizar a detalle cada factor influyente para sectorizar el SN a recuperar considerando: drenaje de agua, eventos de inestabilidad, convergencia, condición estructural y valorización de macizo rocoso.
- Modelamiento numérico por el método de elementos de contorno para determinar halos de influencia en cada secuencia de minado y en las zonas de mayor riesgo.

1.3 Pregunta de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿De qué manera la evaluación geomecánica del rib pillar y sill pillar, mediante el análisis de factores influyentes y el modelamiento numérico, permite determinar la secuencia de minado óptima, el SPAN, el TAS y las restricciones necesarias para la recuperación segura del puente en la veta Ángela NE de la unidad del sur del Peru?

1.3.2 Preguntas especificas

- ¿Cuál es la secuencia de minado óptima para la recuperación del puente en la veta Ángela NE, considerando las restricciones relacionadas con el cálculo de SPAN y TAS?
- ¿Qué factores influyentes deben analizarse para sectorizar el SN a recuperar en la veta Ángela NE?
- ¿Qué halos de influencia se generan en cada secuencia de minado y en las zonas de mayor riesgo mediante el modelamiento numérico por el método de elementos de contorno?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

La presente investigación corresponde a la línea de investigación de geomecánica aplicada a la minería subterránea y optimización de procesos mineros, debido a que se orienta al análisis del comportamiento del macizo rocoso, la estabilidad de excavaciones subterráneas, el diseño de pilares y la determinación de una secuencia de minado segura para la recuperación de mineral.

1.5 Palabra clave

- Evaluación geomecánica
- Rib pillar
- Sill pillar
- SPAN
- TAS

1.6 Justificación e importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad de garantizar condiciones adecuadas de estabilidad durante la recuperación del puente en la veta Ángela NE de la unidad minera al sur del Peru. La recuperación de este tipo de estructuras representa una actividad de altos riesgos geomecánicos, debido a que se desarrolla en zonas influenciadas por labores previas, relleno cementado y detrítico, redistribución de esfuerzos, discontinuidades estructurales y deformaciones acumuladas.

Desde el punto de vista técnico, el estudio es importante porque permitirá determinar la secuencia de minado óptima y las restricciones relacionadas con el SPAN y el TAS, aspectos fundamentales para controlar la estabilidad durante la recuperación del puente. Esta evaluación resulta necesaria debido a que se trata de una primera prueba con una estructura de relleno cementado–detrítico, cuyas condiciones difieren del minado actual en la veta Ángela.

Desde el punto de vista geomecánico, la investigación permitirá analizar los factores influyentes que condicionan el comportamiento del subnivel a recuperar. Entre estos factores se consideran el drenaje de agua, los eventos de inestabilidad, la convergencia, la condición estructural y la valorización del macizo rocoso. Según la investigación, estos elementos presentan influencia directa en la estabilidad de la veta Ángela NE y deben ser evaluados para una adecuada sectorización del área de recuperación.

Desde el enfoque operativo, el estudio contribuirá a reducir la incertidumbre durante la ejecución del minado, ya que permitirá identificar zonas de mayor riesgo y establecer criterios de control antes, durante y después de la recuperación.

CAPÍTULO II

2. Fundamento teórico

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes de la investigación

En la tesis titulada “Minado por subniveles para la recuperación de rellenos detríticos en la veta Matacaballo de la Unidad de Producción Reliquias de Corporación Minera Castrovirreyna S.A.”, desarrolló una investigación orientada a demostrar la viabilidad técnica, económica y operativa del método Sublevel Stoping o minado por subniveles para recuperar rellenos detríticos con valor económico en una mina subterránea previamente explotada por métodos convencionales.

La problemática identificada se relacionó con la existencia de rellenos detríticos enriquecidos con contenidos de plata y oro, generados durante antiguas etapas de explotación mediante corte y relleno ascendente, open stoping y shrinkage. Estos rellenos contenían mineral fino y material marginal que, por las condiciones económicas y tecnológicas de la época, no fueron recuperados adecuadamente. Sin embargo, los métodos convencionales para recuperar dichos materiales presentaban altos costos, baja productividad y mayor exposición del personal a zonas antiguas e inestables.

Frente a esta situación, la tesis propuso implementar el método de minado por subniveles con taladros largos, como alternativa de explotación masiva, mecanizada y de mayor rendimiento. El estudio consideró aspectos geológicos, estructurales, geomecánicos, económicos y tecnológicos para validar la aplicabilidad del método en la veta Matacaballo, ubicada en la zona alta de la Unidad de Producción Reliquias. Además, la investigación empleó la técnica de Nicholas para seleccionar y validar el método de explotación más adecuado, comparándolo con otras alternativas subterráneas.

Desde el punto de vista operativo, el método propuesto contempló la construcción de rampas, by pass, cruceros de extracción, cruceros de perforación, chimeneas y subniveles, con el objetivo de acceder al relleno detrítico y recuperarlo mediante perforación radial con taladros largos. La perforación se realizó con equipos mecanizados, considerando taladros de hasta 25 m, burden de 0.7 m y espaciamiento de 1.2 m. Posteriormente, la voladura se ejecutó con iniciadores no eléctricos, ANFO y una secuencia de salida adecuada, mientras que la limpieza se realizó con scooptrams desde el nivel de extracción.

Los resultados demostraron que el método Sublevel Stoping permitió recuperar aproximadamente el 90 % de los rellenos detríticos, incrementando la productividad y reduciendo los costos frente al método de corte y relleno mecanizado ascendente. La tesis señala que los taladros largos presentaron costos directos relativos menores, mayor ritmo de producción y mejores condiciones de seguridad operativa para el personal y los equipos. Asimismo, se evidenció un incremento progresivo de la producción, alcanzando niveles de hasta 2000 TMD en la operación.

Como aporte principal, la investigación demuestra que la recuperación de rellenos o pilares antiguos requiere una evaluación integral de las condiciones geomecánicas, económicas y operativas. No basta con identificar la existencia de mineral con valor económico; también es necesario validar el método de explotación más seguro y rentable, considerando la estabilidad del macizo rocoso, el diseño de labores, el sostenimiento, la mecanización, el control de dilución, la recuperación y la seguridad del personal. (Aguilar Martinez, 2015)

En la tesis titulada “Diseño de minado en vetas angostas para el control de calidad y costos en la Cía. Minera Casapalca”, desarrolló una investigación orientada a optimizar el diseño de

minado en vetas angostas, poniendo énfasis en el control de calidad de la perforación y voladura, así como en la reducción de costos operativos en la Compañía Minera Casapalca S.A.

La problemática identificada se relacionó con las dificultades propias del minado en vetas angostas, donde la potencia reducida de la estructura mineralizada exige un alto control técnico para evitar sobre rotura, dilución, incremento de costos y pérdida de calidad del mineral extraído. El estudio se enfocó principalmente en la veta Oroya, en los niveles 4900 y 4300, donde se presentan estructuras hidrotermales filoneanas emplazadas en rocas volcánicas andesíticas, con potencias promedio aproximadas de 0.50 m y zonas de mayor dificultad operativa.

La investigación planteó que, para mantener la competitividad de la operación minera, era necesario mejorar los métodos convencionales de explotación y optimizar los parámetros de perforación y voladura. Para ello, el autor analizó métodos como corte y relleno hidráulico, shrinkage stoping y shrinkage estático, considerando las condiciones geológicas, geométricas y geomecánicas del yacimiento. Asimismo, se evaluaron parámetros técnicos como burden, espaciamiento, profundidad del taladro, cuello del taladro, densidad de carga, altura de carga, tipo de explosivo y factor de potencia.

Desde el punto de vista metodológico, la tesis corresponde a una investigación aplicada, descriptiva, comparativa y correlacional, debido a que analiza la relación entre el diseño de malla de perforación, los parámetros de voladura, las características geomecánicas del macizo rocoso y el control de costos unitarios. El estudio utilizó datos de campo, reportes diarios, observación directa, análisis de parámetros operativos y evaluación estadística de resultados para determinar mejoras en la producción y en los costos de minado.

Uno de los aportes principales de la tesis fue la propuesta de una malla de perforación adaptada a vetas angostas, basada en estándares técnicos como un burden aproximado de 0.35 m, espaciamiento de 0.42 m, profundidad de taladro de 1.60 m y factor de potencia de 0.71 kg/Tn. Además, el autor resalta que la calidad de la perforación influye directamente en la calidad de la voladura, señalando que una buena perforación permite obtener una buena voladura, mientras que una mala perforación asegura resultados deficientes.

Los resultados mostraron que el control adecuado de los parámetros de perforación y voladura permitió mejorar la producción y reducir los costos por tonelada. En los cuadros comparativos del estudio se observa que la producción de toneladas métricas secas tuvo una tendencia creciente entre 2012 y 2018, mientras que el costo por tonelada se redujo hasta aproximadamente 41.40 US$/TM en 2018. Esto evidencia que la estandarización de parámetros técnicos y la supervisión operativa contribuyen a mejorar la eficiencia del minado en vetas angostas. (Rivas Zapata, 2021)

En la tesis titulada “Planeamiento de minado subterráneo para vetas angostas: caso práctico; mina Esperanza de Caravelí de Compañía Minera Titán S.R.L.”, desarrolló una investigación orientada a elaborar un plan operativo-económico de mediano plazo para una mina aurífera subterránea de vetas angostas, ubicada en la zona sur del Perú. El estudio tuvo como finalidad analizar la viabilidad de incrementar la producción mensual de mineral de 4 500 toneladas a 6 000 toneladas, aprovechando la capacidad instalada y autorizada de la planta de beneficio.

La problemática abordada se relacionó con la necesidad de cubrir la capacidad de tratamiento de la planta con mineral propio, evitando depender del mineral de acopio. Para ello, la investigación consideró la incorporación de nuevas zonas de producción, especialmente la veta

Dulce en la zona Coila, manteniendo además el aporte de las zonas Aurora y Gisela. La mina Esperanza de Caravelí se caracteriza por presentar vetas angostas de 0.15 m a 0.80 m de potencia, con contenidos de oro, cobre y valores subordinados de plata, lo que exige un planeamiento minero selectivo y técnicamente controlado.

Desde el punto de vista técnico, la tesis integró información geológica, geomecánica, minera, de ventilación, servicios auxiliares, producción, costos e inversiones. El autor realizó una estimación de recursos y reservas bajo criterios del código JORC, evaluó la vida de mina, definió el método de explotación más adecuado y elaboró programas de producción para los años 2012, 2013 y 2014. Asimismo, consideró la evaluación económica mediante ingresos por ventas, costos, inversiones, cash cost, margen operativo, VAN y análisis de sensibilidad.

En el aspecto geomecánico, la investigación utilizó clasificaciones como RMR y GSI modificado para caracterizar el macizo rocoso, determinar condiciones de estabilidad y definir sostenimiento en labores subterráneas. Además, se identificaron sistemas principales de discontinuidades mediante análisis estereográfico, lo cual permitió orientar las excavaciones de manera más favorable para la estabilidad. Este enfoque demuestra la importancia de relacionar la dirección de avance de las labores con la estructura del macizo rocoso para reducir condiciones desfavorables durante la explotación.

Para seleccionar el método de explotación, el autor aplicó la metodología de Nicholas, comparando alternativas como cámaras y pilares, shrinkage stoping y cut and fill stoping. Los resultados indicaron que el método más adecuado para las condiciones de la mina Esperanza era el Corte y Relleno Ascendente, debido a su alta recuperación, selectividad y mejor adaptación a vetas angostas con mineralización irregular. Este método permite explotar zonas de mayor ley y

dejar sin extraer sectores de baja ley, lo cual es especialmente importante en yacimientos de geometría variable.

Los resultados del estudio evidenciaron que el incremento de producción requería una adecuada coordinación entre exploración, desarrollo, preparación y explotación. La tesis determinó que era necesario contar con aproximadamente 25 tajos de producción continua, distribuidos entre las zonas Aurora, Gisela y Coila, para alcanzar el tonelaje requerido por la planta. Además, se resaltó que en minas auríferas de vetas angostas la vida de mina suele ser corta si no se mantiene una reposición constante de reservas, por lo que el planeamiento debe estar acompañado de exploración permanente. (Mena Salas, 2012)

2.2 Bases teóricas del proyecto

2.3 Hipótesis

La evaluación geomecánica del comportamiento del rib pillar y sill pillar, mediante el análisis de las condiciones geológicas, estructurales, hidrogeológicas, la calidad del macizo rocoso, las deformaciones y el modelamiento numérico por el método de elementos de contorno, permitirá diseñar una secuencia de minado segura y técnicamente viable para la recuperación de la veta Ángela NE. Esta secuencia considerará un SPAN de 6 m, un rib pillar de 1,0 m hacia la caja techo, un sill pillar de 0,5 m y un TAS inmediato, con relleno en pasta antes de las 12 horas posteriores al minado de cada panel, reduciendo la probabilidad de falla y controlando la perturbación geomecánica en las zonas próximas a la recuperación.

2.3.1 Variable dependiente

- Diseño de la secuencia de minado para la recuperación segura de la veta Ángela NE

2.3.2 Variable independiente

- Evaluación geomecánica del rib pillar y sill pillar.

Tabla 1
Operacionalización de variables

Variable	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Técnica e instrumentos
Independiente: Evaluación geomecánica del rib pillar y sill pillar	Análisis de las condiciones del macizo rocoso y del comportamiento geomecánico de los pilares mediante información de campo, monitoreo y modelamiento numérico.	Caracterización del macizo rocoso	RMR y GSI; tipo de roca; potencia de fallas; orientación, buzamiento y persistencia de discontinuidades; presencia de agua.	Ordinal, nominal y razón	Mapeo geomecánico, fichas de campo, planos geológicos y geomecánicos.
		Deformación e inestabilidad	Convergencia (mm); velocidad (mm/día); aceleración; eventos de inestabilidad; fisuramiento y relajamiento del macizo rocoso.	Razón y nominal	Estaciones de convergencia, inspección de campo y registros de eventos.
Dependiente: Diseño de la secuencia de minado para la recuperación segura de la veta Ángela NE	Determinación del orden de extracción y de los parámetros de diseño que proporcionen estabilidad y menor probabilidad de falla durante la recuperación del puente mineralizado.	Secuencia y geometría de minado	Orden de extracción; número de etapas; SPAN (m); dimensiones del rib pillar y sill pillar (m).	Ordinal y razón	Planos de secuenciamiento, modelos tridimensionales y cuadros comparativos.

Nota. Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como base de diseño de secuencia de minado con RIB y SILL PILLAR para recuperación de veta Angela

CAPÍTULO III

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

La investigación comprende la evaluación geomecánica del rib pillar y sill pillar durante la recuperación del puente mineralizado de la veta Ángela NE, ubicada en una unidad minera subterránea del sur del Perú. El estudio se concentra principalmente en el sector del SN 9863 y en las áreas próximas que pueden verse afectadas por la redistribución de esfuerzos producida durante el minado.

El alcance técnico incluye la revisión de las condiciones geológicas, estructurales, hidrogeológicas y geomecánicas del sector. Para ello, se consideran la calidad del macizo rocoso, la presencia y potencia de fallas, la orientación y persistencia de las discontinuidades, el drenaje de agua, los eventos de inestabilidad y las deformaciones registradas en las labores cercanas.

Asimismo, se analizan los resultados obtenidos en las estaciones de convergencia, considerando la deformación acumulada, velocidad y aceleración. Esta información se emplea para reconocer los sectores con mayor relajamiento y establecer criterios de control durante la recuperación.

El estudio también comprende el modelamiento numérico mediante el método de elementos de contorno. Se comparan escenarios de minado con SPAN de 6, 8 y 10 m, manteniendo como parámetros de diseño un rib pillar de 1,0 m hacia la caja techo y un sill pillar de 0,5 m. La comparación permite determinar los porcentajes de área estable e inestable, los halos de influencia, las deformaciones y la probabilidad de falla generada en cada alternativa.

Como resultado, se busca establecer una secuencia de minado segura y técnicamente viable, que considere el orden de extracción de los paneles, las restricciones de SPAN y TAS,

las dimensiones de los pilares, el sostenimiento, el monitoreo de convergencia y la colocación del relleno en pasta antes de las 12 horas posteriores al minado.

Entre las principales limitaciones se encuentra la variabilidad natural del macizo rocoso. La calidad de la roca no es uniforme a lo largo de la veta y existen zonas de falla cuya potencia y continuidad no pueden conocerse con total precisión antes de ser expuestas. Esta condición puede ocasionar diferencias entre el comportamiento previsto por el modelo y el observado durante la ejecución.

Otra limitación corresponde a la información disponible sobre el drenaje de agua. Los registros permiten identificar y georreferenciar los sectores con afluencia; sin embargo, no se dispone de mediciones continuas de presión de agua en todas las fallas y discontinuidades. Por esta razón, el efecto del agua se analiza principalmente a partir de las evidencias y registros recopilados en campo.

El modelamiento numérico también presenta limitaciones, debido a que representa el macizo mediante parámetros idealizados. El modelo permite estimar la redistribución de esfuerzos y deformaciones, pero no reproduce por completo todos los procesos de fracturamiento progresivo, daño por voladura, alteración de discontinuidades o cambios en la calidad del relleno. Por ello, sus resultados deberán comprobarse mediante monitoreo geomecánico durante la ejecución del minado.

Finalmente, la investigación se desarrolla como un estudio de caso. Los resultados y parámetros obtenidos serán aplicables principalmente a la veta Ángela NE y a las condiciones analizadas en el SN 9863. En consecuencia, el SPAN, las dimensiones de los pilares y el tiempo de relleno no deben aplicarse directamente en otras zonas sin una evaluación geomecánica previa.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, debido a que utiliza conocimientos y herramientas de geomecánica para resolver un problema concreto relacionado con la recuperación segura del puente mineralizado de la veta Ángela NE. La finalidad no es solamente describir las condiciones del macizo rocoso, sino establecer una propuesta técnica de secuencia de minado que pueda emplearse en la operación.

El estudio presenta un enfoque principalmente cuantitativo, porque trabaja con valores de RMR, GSI, convergencia, velocidad de deformación, SPAN, dimensiones de pilares, porcentajes de estabilidad, esfuerzos inducidos y halos de influencia. Estos datos son procesados y comparados para determinar el escenario de minado que presenta mejores condiciones geomecánicas.

También se emplea información cualitativa procedente de las inspecciones de campo, como la identificación de fisuras, mallas sobrecargadas, placas de pernos hundidas, concreto fracturado, relajamiento del macizo y presencia de agua. Esta información complementa los resultados numéricos y permite interpretar de una manera más completa el comportamiento observado.

El diseño de la investigación es no experimental, ya que las condiciones geológicas y geomecánicas del sector no son modificadas directamente por el investigador. Se analizan registros reales de la operación y se simulan diferentes alternativas mediante un modelo numérico. Asimismo, corresponde a un estudio de caso, porque se concentra en una zona específica de la veta Ángela NE.

La investigación tiene un componente longitudinal, debido a que utiliza mediciones de convergencia realizadas en distintos momentos. Esto permite analizar la evolución de la

deformación, la velocidad y la aceleración, en lugar de evaluar únicamente una medición aislada.

3.2.2 Nivel de investigación

La investigación presenta un nivel descriptivo y explicativo. Es descriptiva porque identifica y caracteriza las condiciones existentes en la zona de recuperación, tales como calidad del macizo rocoso, orientación de las discontinuidades, potencia de las fallas, presencia de agua, eventos de inestabilidad y comportamiento de las convergencias.

Es explicativa porque busca determinar cómo estas condiciones, junto con el incremento del SPAN y la recuperación progresiva de los pilares, influyen en la estabilidad de la excavación. Mediante el modelamiento numérico se analiza la forma en que los esfuerzos y deformaciones cambian en cada secuencia de minado.

El nivel explicativo también se refleja en la comparación de los escenarios de 6, 8 y 10 m de SPAN. Esta comparación permite reconocer la relación existente entre el aumento de la superficie expuesta y el incremento de las zonas inestables y halos de deformación.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población está constituida por las condiciones geológicas, estructurales, hidrogeológicas y geomecánicas presentes en la veta Ángela NE, así como por los registros técnicos generados durante su preparación y explotación.

Dentro de la población se consideran:

- Los sectores de caja techo, veta y caja piso.
- Las fallas y discontinuidades presentes en la zona.

- Los registros de calidad del macizo rocoso.
- Las zonas con drenaje de agua.
- Los eventos de inestabilidad registrados.
- Las mediciones de convergencia, velocidad y aceleración.
- Los planos geológicos y geomecánicos.
- Las secciones topográficas y sólidos tridimensionales.
- Los escenarios de recuperación del puente mineralizado.

La población no está compuesta por personas, sino por el macizo rocoso, las excavaciones y la información geomecánica disponible de la veta Ángela NE.

3.3.2 Muestra

La muestra está conformada por la zona de recuperación del puente mineralizado en el SN 9863 de la veta Ángela NE y por las áreas próximas que pueden verse afectadas durante la secuencia de extracción.

La selección de la muestra es no probabilística e intencional, debido a que se eligió el sector que presenta el problema geomecánico y en el cual se realizará la recuperación. La elección se fundamenta en la presencia de fallas hacia la caja techo, deformaciones del sostenimiento, drenaje irregular, discontinuidades persistentes y valores de convergencia que aumentan hacia determinados sectores. La muestra comprende:

- La zona del puente mineralizado que se proyecta recuperar.
- La caja techo y caja piso próximas a la recuperación.
- El sector comprendido aproximadamente entre las progresivas −30 y +30, donde se identifica una mayor influencia de fallas.

- Las diez estaciones de convergencia consideradas en la evaluación inicial.
- Los registros de eventos de inestabilidad y drenaje ubicados en el sector.
- Los tres escenarios de modelamiento correspondientes a SPAN de 6, 8 y 10 m.
- El rib pillar de 1,0 m y el sill pillar de 0,5 m considerados en el diseño.

Se utilizará la totalidad de los registros disponibles y válidos correspondientes a la zona seleccionada. Por esta razón, dentro del sector de recuperación, la revisión de la información tendrá carácter censal.

3.4 Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

El desarrollo de la investigación seguirá un procedimiento ordenado que permitirá integrar la información de campo con los resultados del modelamiento numérico.

Recopilación de información

Se recopilarán los informes geomecánicos anteriores, planos geológicos, planos topográficos, mapeos geomecánicos, registros de convergencia, reportes de inestabilidad, información sobre drenaje y sólidos tridimensionales de la veta Ángela NE.

La información será revisada para verificar su relación con la zona de recuperación. Los datos incompletos, duplicados o que no puedan ubicarse espacialmente serán separados del análisis principal.

Reconocimiento y sectorización geomecánica

Se identificarán las condiciones de la caja techo, veta y caja piso. La zona será dividida en sectores de acuerdo con la calidad del macizo, presencia de fallas, condición estructural, drenaje, eventos de inestabilidad y comportamiento deformacional.

La clasificación del macizo se realizará empleando los índices RMR y GSI disponibles. También se evaluará la orientación, buzamiento y persistencia de las discontinuidades respecto de la dirección de la veta y de las superficies que quedarán expuestas.

Análisis de eventos de inestabilidad

Se revisarán los registros de desprendimientos y las evidencias de relajamiento del macizo. Se considerarán indicadores como hundimiento de placas de pernos, sobrecarga de mallas, agrietamiento del concreto, presencia de lajas y fisuras persistentes.

Los eventos serán ubicados en los planos para determinar si se concentran cerca de fallas, intersecciones o sectores con baja calidad geomecánica.

Análisis de convergencias

Se procesarán las mediciones de las diez estaciones de convergencia consideradas en el informe geomecánico. Para cada estación se analizará la deformación acumulada en milímetros, la velocidad expresada en milímetros por día y los cambios de velocidad.

Los resultados permitirán elaborar planos de isovalores e identificar los sectores donde la deformación presenta una tendencia creciente. Durante la recuperación se deberán instalar cinco puntos adicionales de convergencia en la intersección y efectuar mediciones después de cada voladura.

Elaboración del modelo numérico

Se utilizará el método de elementos de contorno para representar la geometría de la veta, las labores existentes, el puente mineralizado, el rib pillar, el sill pillar y los sectores rellenados.

Como condiciones iniciales se considerarán los parámetros geomecánicos disponibles, la orientación de los esfuerzos principales y las características del macizo rocoso. El modelo será construido por etapas para reproducir el avance de la secuencia de minado.

Simulación de alternativas

Se simularán tres escenarios correspondientes a SPAN de 6, 8 y 10 m. En cada escenario se mantendrá un rib pillar de 1,0 m hacia la caja techo y un sill pillar de 0,5 m como protección frente al daño por voladura.

En cada alternativa se evaluarán las deformaciones, concentración de esfuerzos, halos de influencia, porcentaje de superficie estable e inestable y probabilidad de falla. La comparación permitirá reconocer la alternativa que genere una menor perturbación.

Diseño de la secuencia de minado

Con los resultados obtenidos se establecerá el orden de recuperación de los paneles, las restricciones de SPAN, las dimensiones de los pilares, los requerimientos de monitoreo y el tiempo máximo de exposición.

Después del minado de cada panel se considerará el relleno en pasta antes de las 12 horas. También se establecerán criterios de paralización cuando la velocidad de convergencia supere los 2 mm/día o se presenten fisuras persistentes y relajamiento masivo.

Validación técnica

La propuesta será revisada comparando los resultados del modelo con las condiciones observadas en campo. Si durante la ejecución se registran deformaciones o condiciones diferentes a las previstas, la secuencia deberá ser suspendida y evaluada nuevamente.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas utilizadas serán las siguientes:

- **Revisión documental:** permitirá recopilar información procedente de informes técnicos, planos, secciones geológicas, bases de datos de mapeo, reportes de inestabilidad y registros de monitoreo.
- **Observación directa:** se empleará para reconocer las condiciones reales de las labores, el estado del sostenimiento, presencia de agua, fisuramiento, relajamiento y otros indicadores de inestabilidad.
- **Mapeo geomecánico:** permitirá registrar la calidad del macizo rocoso y las características de las discontinuidades, considerando orientación, buzamiento, persistencia, espaciamiento, apertura, relleno, rugosidad y alteración.
- **Monitoreo de convergencia:** se utilizará para medir la deformación de la excavación y determinar su velocidad y cambios de tendencia.
- **Georreferenciación de eventos:** permitirá ubicar en planos los sectores con drenaje de agua, eventos de inestabilidad y deformaciones del sostenimiento.
- **Modelamiento numérico:** se empleará para simular las diferentes secuencias de minado y estimar los esfuerzos, desplazamientos y halos de influencia.
- **Análisis comparativo:** permitirá contrastar los resultados obtenidos para los SPAN de 6, 8 y 10 m y seleccionar la alternativa con mejores condiciones de estabilidad.

3.4.3 Instrumentos de medición

Para la recolección y procesamiento de la información se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Fichas de mapeo geomecánico para el registro de RMR, GSI y características de las discontinuidades.

- Formatos de inspección de labores para documentar fisuras, relajamiento, sostenimiento dañado y otros eventos de inestabilidad.
- Planos geológicos, topográficos y geomecánicos de la veta Ángela NE.
- Secciones longitudinales, transversales y vistas en planta de la zona de recuperación.
- Registros de drenaje y formatos de georreferenciación de afluencias de agua.
- Diez estaciones de convergencia correspondientes a la evaluación inicial.
- Cinco puntos adicionales de convergencia propuestos para controlar la intersección durante la recuperación.
- Registros de deformación acumulada, velocidad y aceleración de convergencia.
- Brújula geológica o equipo equivalente para verificar la orientación y buzamiento de las discontinuidades.
- Cinta métrica o distanciómetro para verificar dimensiones, aperturas y potencias visibles.
- Sólidos tridimensionales de la veta, labores, relleno y puente mineralizado.
- Software Map3D para el análisis numérico mediante elementos de contorno.
- Hojas de cálculo y matrices de procesamiento para ordenar y comparar la información.

Los equipos de medición deberán encontrarse operativos y, cuando corresponda, contar con verificación o calibración vigente. Las fichas y formatos también deberán utilizar criterios uniformes para evitar diferencias entre una inspección y otra.

3.4.4 Plan de análisis estadístico de los datos

Los datos serán organizados en una matriz de acuerdo con su ubicación, fecha, tipo de registro y variable geomecánica. El análisis será principalmente descriptivo, espacial y comparativo.

- Para los datos cuantitativos se calcularán, según su disponibilidad:
- Valores mínimos y máximos.
- Promedio y mediana.
- Rango de variación.
- Desviación estándar.
- Deformación acumulada en milímetros.
- Velocidad de convergencia en milímetros por día.
- Variación de la velocidad entre mediciones.
- Porcentaje de superficie estable e inestable.
- Dimensión promedio de los halos de influencia.

Para los datos cualitativos se utilizarán frecuencias y porcentajes. De esta manera, se podrá conocer la distribución de los tipos de roca, condiciones de discontinuidades, eventos de inestabilidad y sectores con presencia de agua.

Los resultados de convergencia serán analizados mediante series temporales. Se elaborarán gráficos de deformación y velocidad para reconocer tendencias estables, crecientes o aceleradas. También se elaborarán planos de isovalores para mostrar la distribución espacial de las deformaciones.

Los resultados del modelo numérico se presentarán mediante cuadros comparativos para los escenarios de 6, 8 y 10 m de SPAN. Los principales criterios de comparación serán:

- Porcentaje de área estable.
- Porcentaje de área inestable.
- Magnitud de los desplazamientos.
- Extensión del halo de influencia.
- Concentración de esfuerzos.
- Probabilidad de falla.
- Restricciones operacionales requeridas.

No se aplicará estadística inferencial para generalizar los resultados hacia otras unidades mineras, debido a que la muestra es intencional y corresponde a un estudio de caso. El análisis estadístico servirá para describir el comportamiento del sector y sustentar técnicamente la selección de la secuencia de minado.

3.5 Lugar de desarrollo de investigación

La investigación se desarrollará en una unidad minera subterránea ubicada al sur del Perú. El trabajo de campo se concentrará en la veta Ángela NE, específicamente en el sector donde se proyecta recuperar el puente mineralizado.

Las inspecciones, mapeos y mediciones serán efectuados en las labores subterráneas relacionadas con el SN 9863. El procesamiento de la información, la elaboración de planos, el análisis de convergencia y el modelamiento numérico se realizarán en las áreas de Geomecánica y Servicios Técnicos de la unidad minera.

El estudio utilizará información obtenida directamente de la operación, como planos, sólidos tridimensionales, reportes de inestabilidad, registros de drenaje y mediciones de convergencia.

3.6 Ambiente que utilizar

El ambiente principal de la investigación estará conformado por las labores subterráneas de la veta Ángela NE. En estas labores se efectuarán las inspecciones visuales, la verificación del sostenimiento, el reconocimiento de estructuras y el monitoreo de convergencia.

También se utilizará un ambiente de gabinete para procesar la información geológica y geomecánica. Este ambiente contará con equipos informáticos para revisar planos, elaborar bases de datos y desarrollar el modelo numérico.

Por consiguiente, la investigación se realizará en dos ambientes complementarios:

- **Ambiente de campo:** labores subterráneas, accesos, intersecciones y zona de recuperación.
- **Ambiente de gabinete:** oficina técnica destinada al procesamiento de datos, modelamiento numérico y elaboración de la secuencia de minado.

3.6.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la veta Ángela NE, dentro de una unidad minera subterránea del sur del Perú. El análisis se concentra en la zona de recuperación del puente mineralizado correspondiente al SN 9863.

El área comprende el puente, la caja techo, la caja piso y los extremos norte y sur que pueden verse influenciados por la recuperación. Se presta especial atención al sector comprendido aproximadamente entre las progresivas −30 y +30, debido a la presencia de fallas paralelas y estructuras de contacto cuya potencia y halo de influencia no se encuentran completamente definidos.

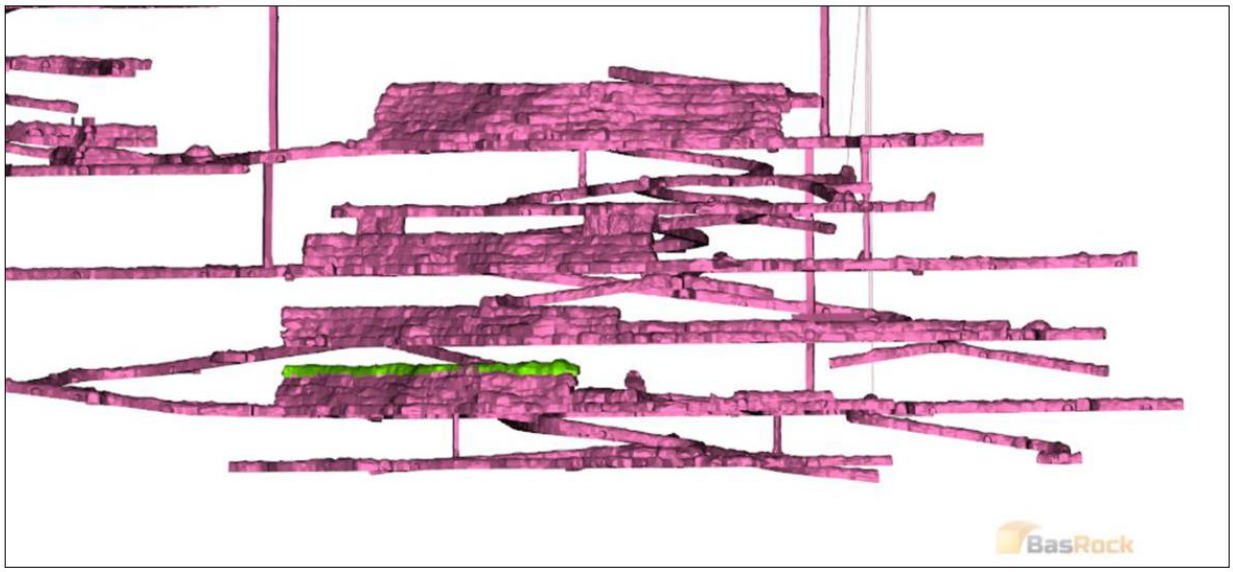
La caja techo constituye uno de los sectores más sensibles, debido a la presencia de zonas de falla con potencias superiores a 1,5 m. Por esta razón, el diseño considera mantener un rib pillar hacia dicha caja. En la parte inferior de la excavación se conservará el sill pillar como escudo para disminuir el daño generado por las voladuras.

La ubicación seleccionada permite evaluar directamente el comportamiento del macizo en la zona crítica y establecer una secuencia de recuperación acorde con las condiciones reales de la veta.

3.6.2 Información técnica de zona de recuperación veta Angela

La vista este-oeste muestra la distribución vertical de las labores subterráneas desarrolladas alrededor de la veta Ángela NE. La zona resaltada en color verde representa el sector considerado para la recuperación del puente mineralizado. Su ubicación entre labores previamente explotadas permite observar la relación espacial con los niveles superior e inferior, así como la cercanía de excavaciones que pueden influir en la redistribución de esfuerzos. Esta representación constituye la base geométrica para evaluar la estabilidad del puente y definir una secuencia de recuperación segura de la veta Ángela.

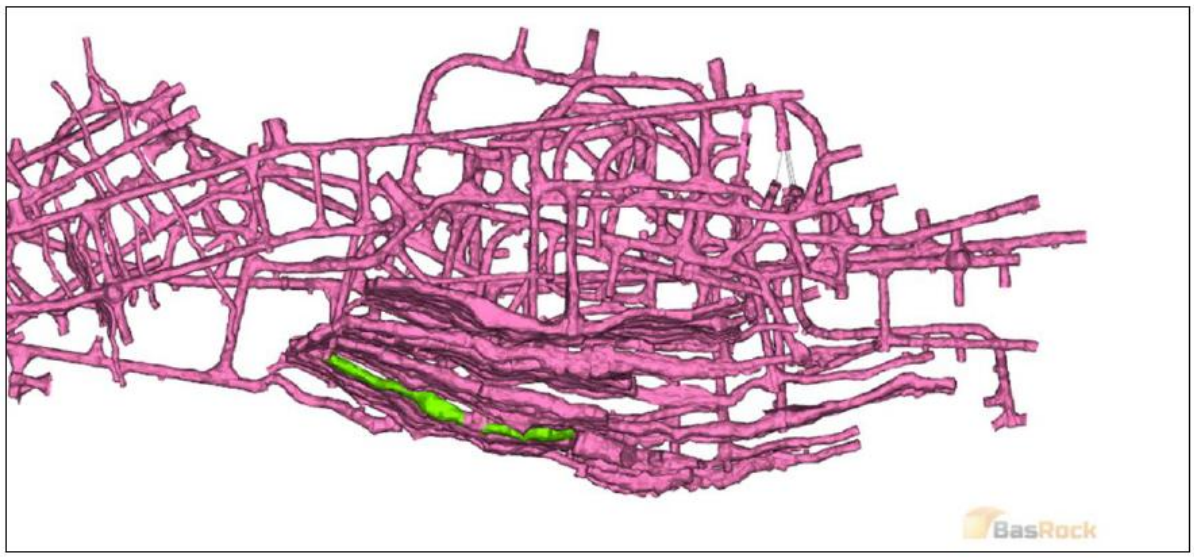
Figura 1
Vista este – oeste veta Ángela NE



Nota. Vista Este - Oeste en veta Ángela con software BasRock.

La vista en planta permite identificar la orientación y continuidad longitudinal de la veta Ángela NE dentro del conjunto de labores mineras. La zona de recuperación se encuentra rodeada por accesos, galerías y excavaciones ejecutadas durante las etapas anteriores de explotación. Asimismo, se observa que la geometría de la veta no es completamente uniforme, debido a que presenta cambios de dirección y variaciones en su potencia. Estas condiciones deben considerarse en el diseño de los paneles de recuperación y en la ubicación de los pilares de protección.

Figura 2
Vista en planta veta Ángela NE



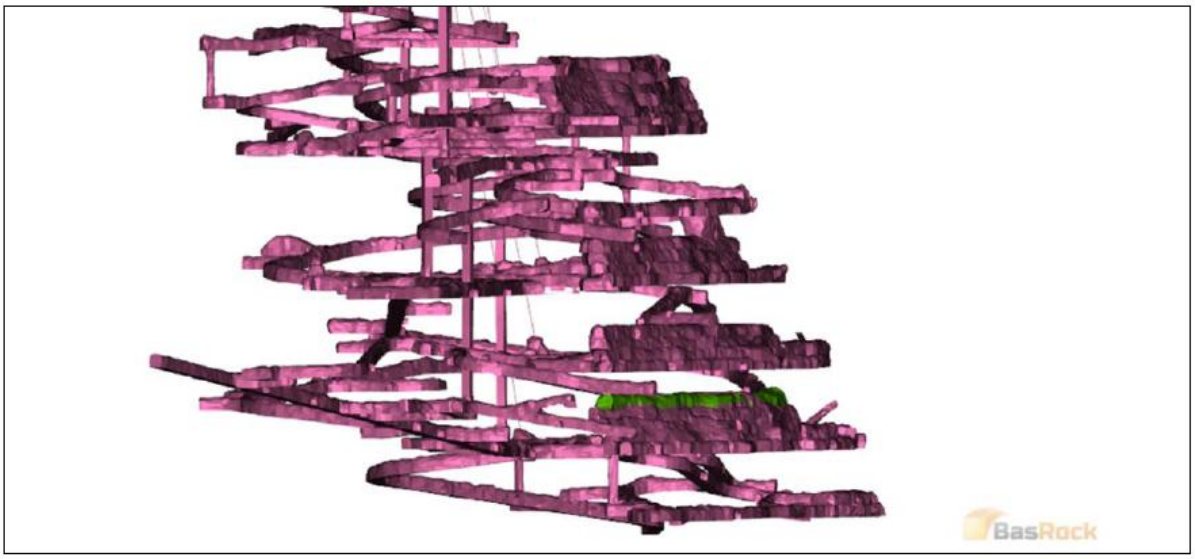
Nota. Vista en planta en veta Ángela con software BasRock.

La vista sur-norte muestra la posición del puente mineralizado respecto de los distintos niveles y labores existentes. Esta perspectiva permite apreciar la continuidad vertical de la zona de recuperación y su relación con los espacios explotados ubicados por encima y por debajo.

La presencia de numerosas excavaciones cercanas evidencia una geometría minera compleja, en la cual pueden generarse concentraciones de esfuerzos y pérdida de

confinamiento. Por este motivo, la recuperación debe ejecutarse mediante una secuencia controlada que mantenga la estabilidad del macizo rocoso y del relleno cementado.

Figura 3
Vista sur - norte veta Ángela NE



Nota. Vista sur - norte veta Ángela NE con software BasRock.

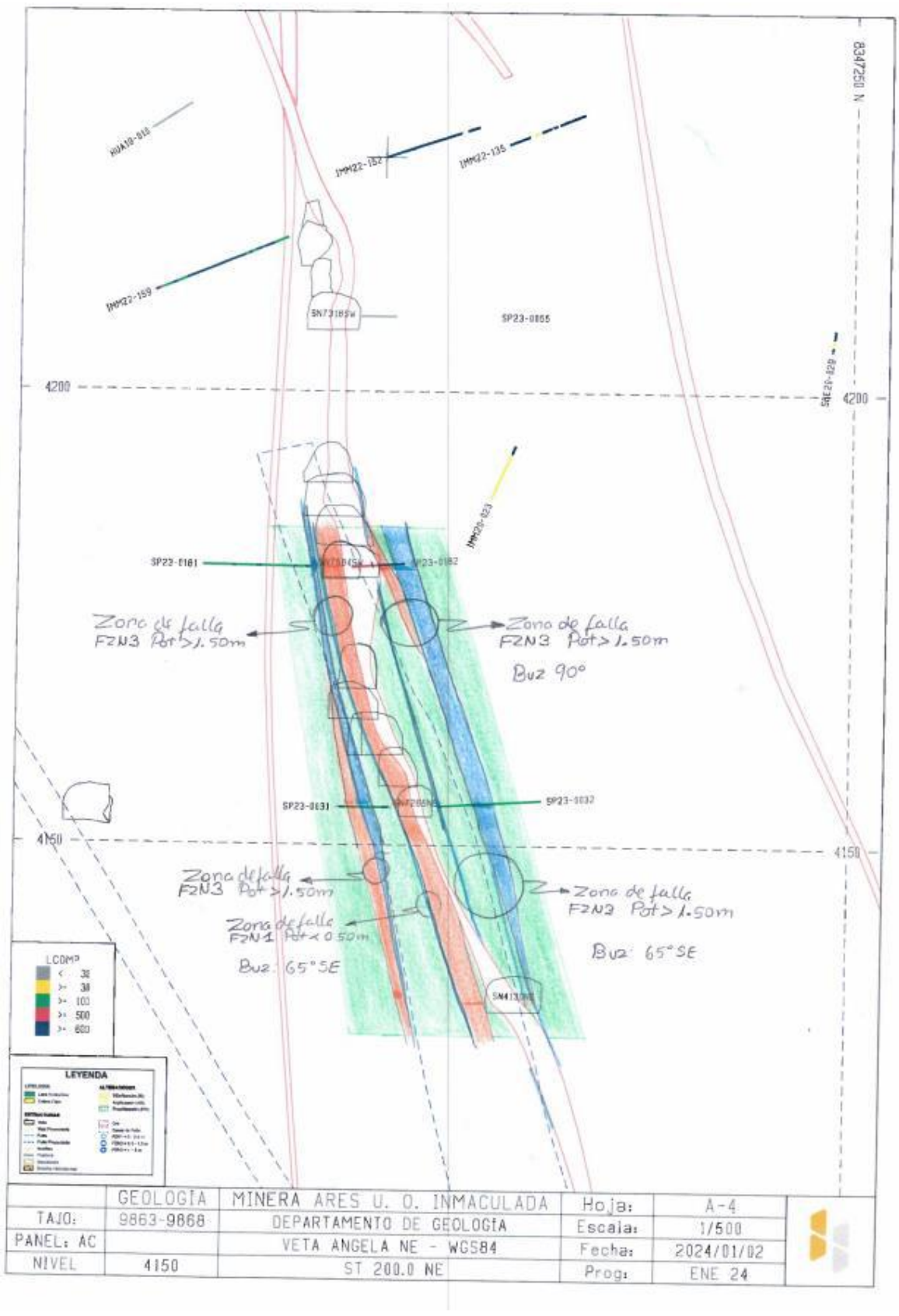
3.7 Secciones geológicas

Como se observa en las siguientes secciones transversales: ST 200 (Sur), ST 260, ST 300 (Norte), ubicada hacia el sector sur, muestra la disposición de la veta y su relación con las estructuras presentes en la caja techo y la caja piso. Se identifican zonas de falla con espesores variables, algunas superiores a 1,50 m, que reducen la calidad del macizo rocoso y pueden favorecer desprendimientos durante la recuperación.

La geometría inclinada de la veta y la proximidad de estas estructuras evidencian la necesidad de controlar la perforación, la voladura y la exposición de las cajas.

Figura 4

Sección transversal SN 9863 NE ST200

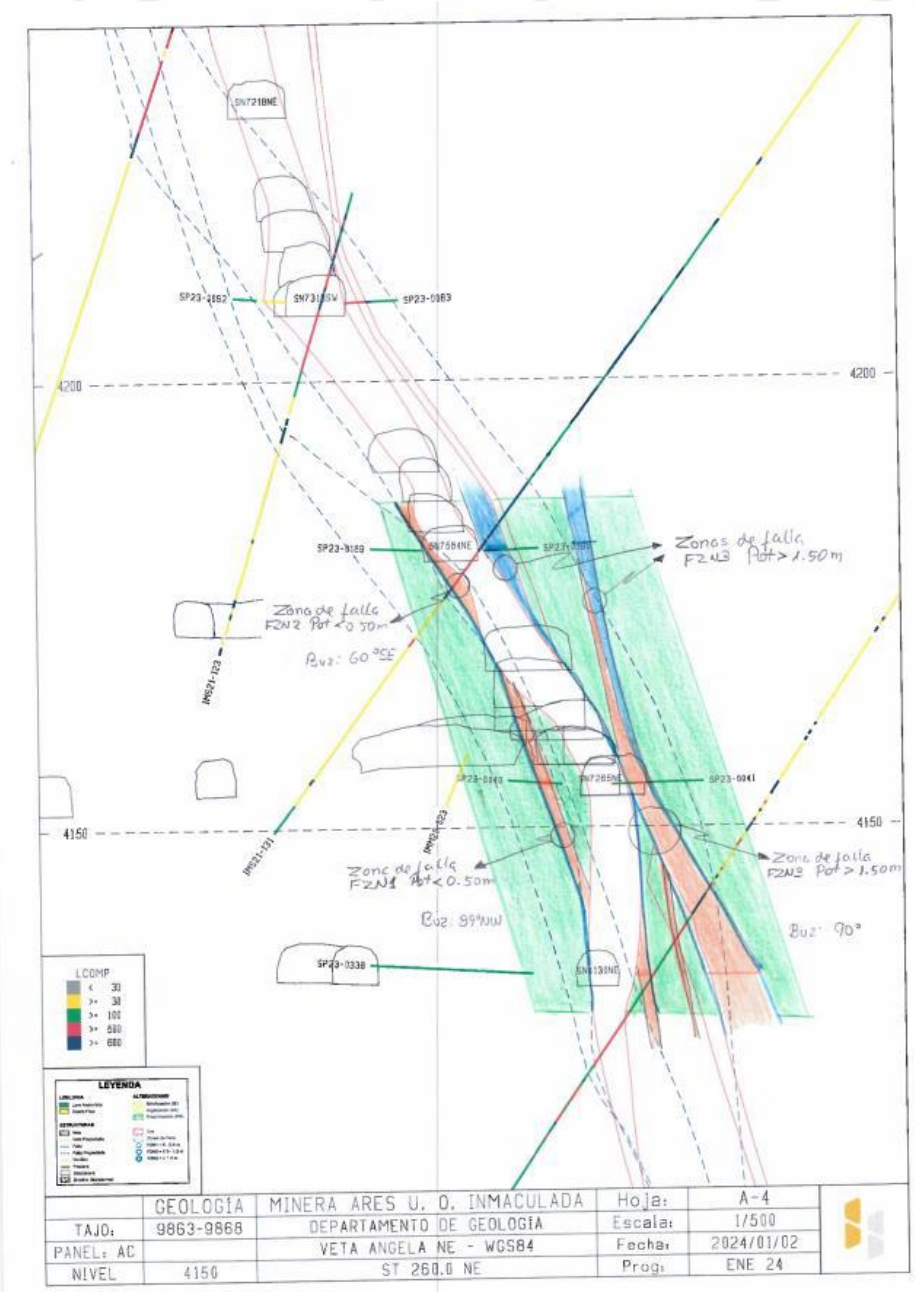


Nota. Sección transversal SN 9863 NE ST 200 a mano alzada.

La sección ST 260 representa la zona intermedia del sector evaluado. En esta sección se observa la continuidad de las fallas a ambos lados de la estructura mineralizada, con mayor presencia en la caja techo. La intersección de estas discontinuidades con las labores mineras puede producir sectores localmente debilitados y favorecer la apertura de fracturas. En consecuencia, esta zona requiere un seguimiento geomecánico permanente y un adecuado control del sostenimiento durante el proceso de recuperación.

Figura 5

Sección transversal SN 9863 NE ST260 NE

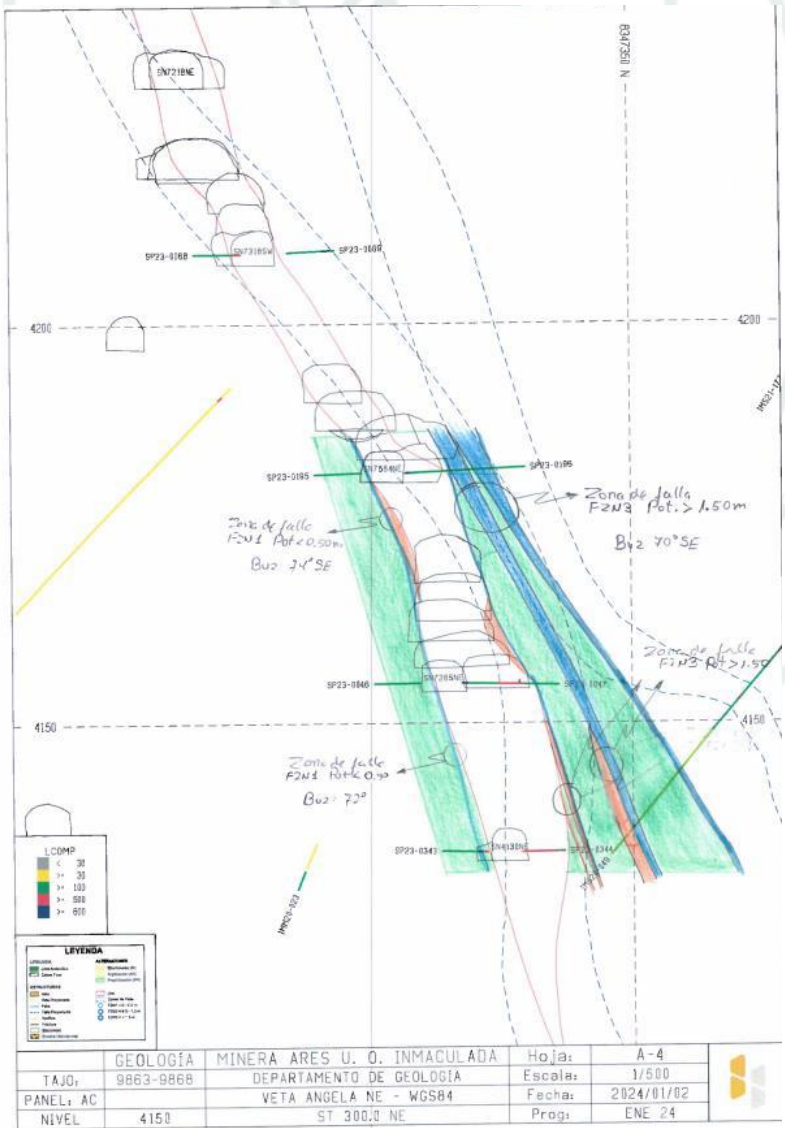


Nota. Sección transversal SN 9863 NE ST 260 a mano alzada.

La sección ST 300, localizada hacia el norte, evidencia un incremento de la potencia de la veta, que alcanza aproximadamente 11 m. Al mismo tiempo, se observan zonas de falla persistentes y una mayor complejidad geométrica alrededor de la caja techo. El aumento del ancho mineralizado representa una oportunidad para recuperar un mayor volumen de mineral; sin embargo, también incrementa el vano potencialmente expuesto. Por ello, el diseño debe considerar paneles de dimensiones controladas y la conservación de pilares que reduzcan el riesgo de inestabilidad.

Figura 6

Sección transversal SN 9863 NE ST 300



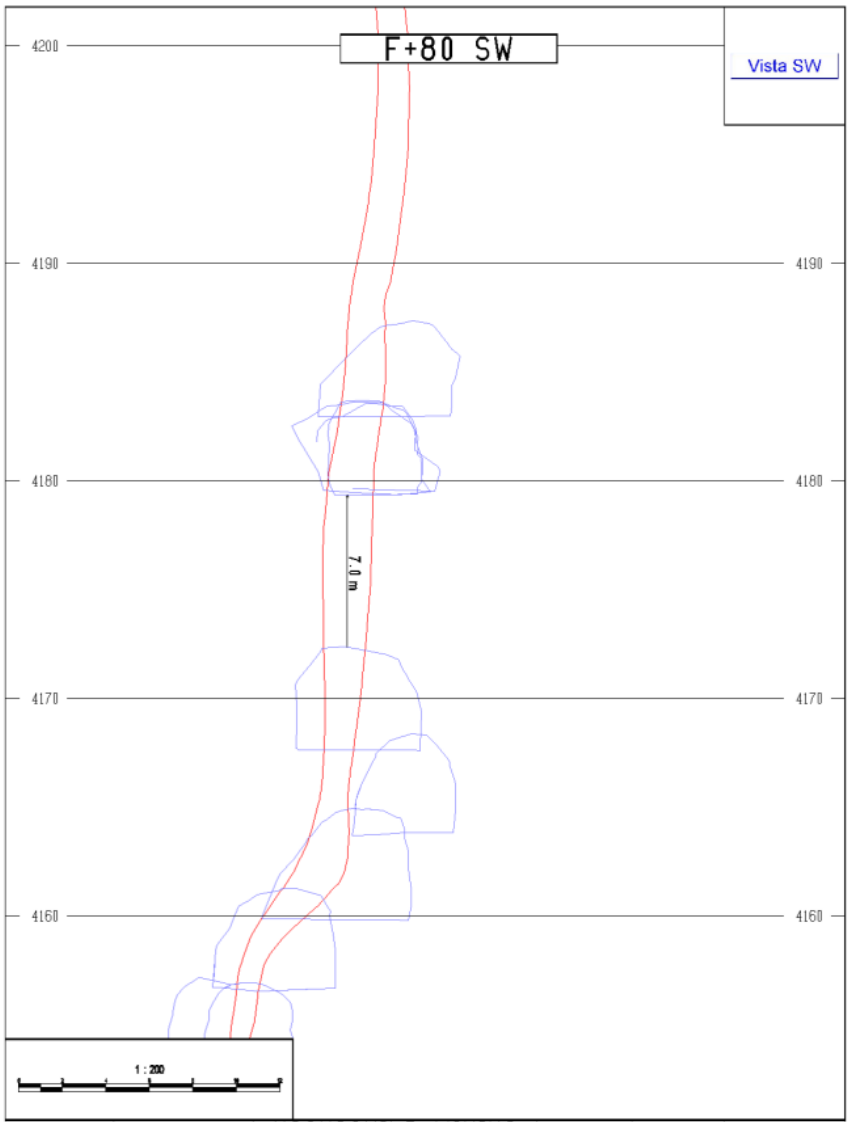
Nota. Sección transversal SN 9863 NE ST 300 a mano alzada.

En conjunto, las secciones ST 200, ST 260 y ST 300 muestran que la potencia de la veta aumenta progresivamente de sur a norte. También evidencian que la caja techo presenta fallas con espesores superiores a 1,50 m, condición que puede afectar la estabilidad de los paneles de recuperación. Estos resultados justifican la aplicación de un diseño diferenciado según las condiciones encontradas en cada sector.

3.8 Secciones topográficas

La sección F+80, correspondiente al sector sur, muestra una geometría relativamente estrecha y variable entre las excavaciones de los bloques superior e inferior. Los contornos de las labores evidencian irregularidades originadas por la geometría natural de la veta y por la explotación previa. Esta condición puede ocasionar variaciones en la altura y el ancho efectivo del puente, por lo que resulta necesario verificar las dimensiones reales antes de iniciar la perforación de recuperación.

Figura 7
Sección transversal S + 80 SW

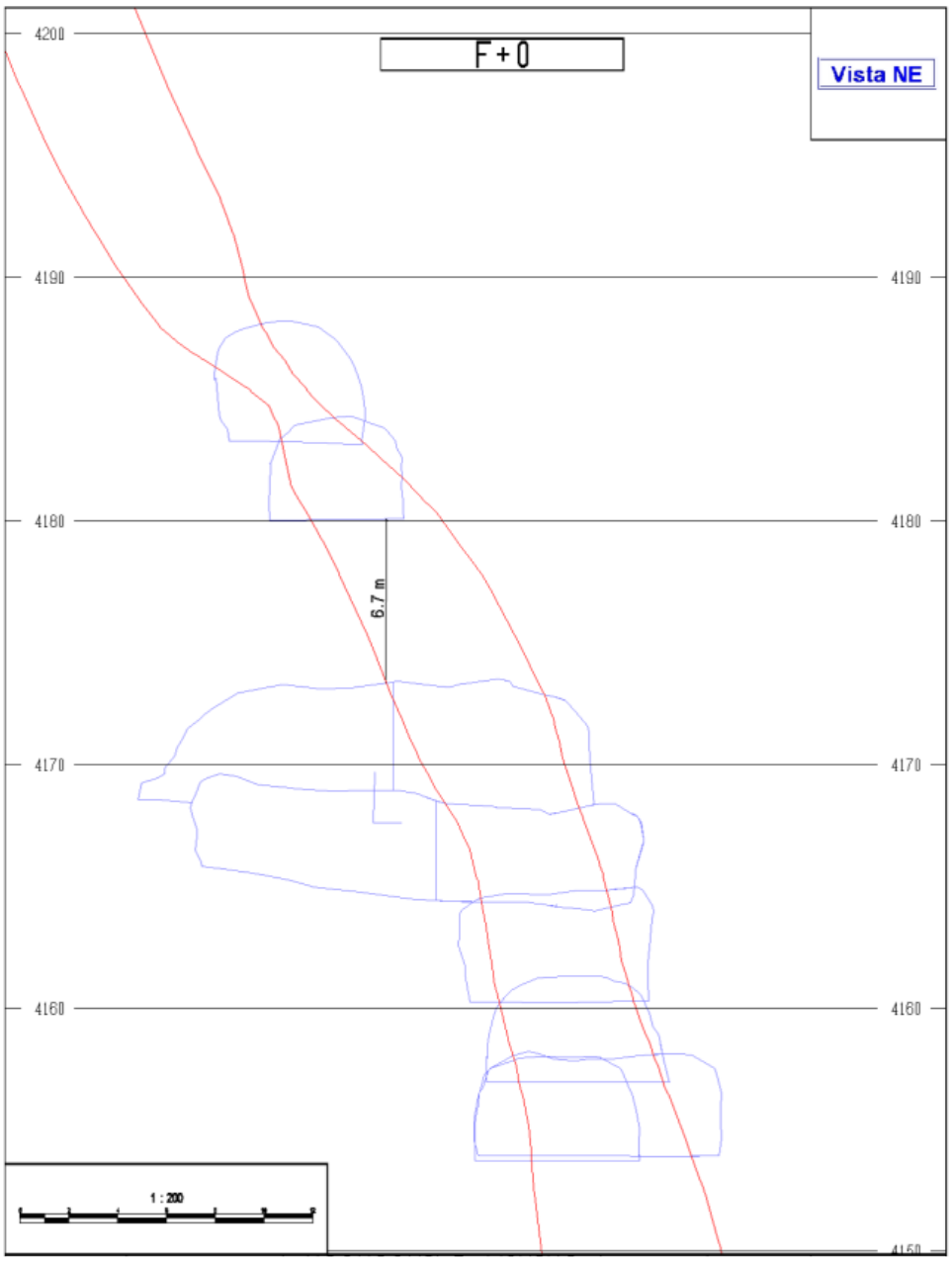


Nota. Sección transversal S + 80 SW.

La sección F+0 corresponde al sector de intersección y permite observar una inflexión en la geometría de la veta. Los cambios en el alineamiento de las labores superior e inferior muestran que el puente no mantiene una sección constante a lo largo de su extensión. Esta irregularidad influye en la distribución de esfuerzos y puede generar zonas con menor confinamiento. Por esta razón, la intersección debe considerarse como un punto sensible dentro de la secuencia de minado.

Figura 8

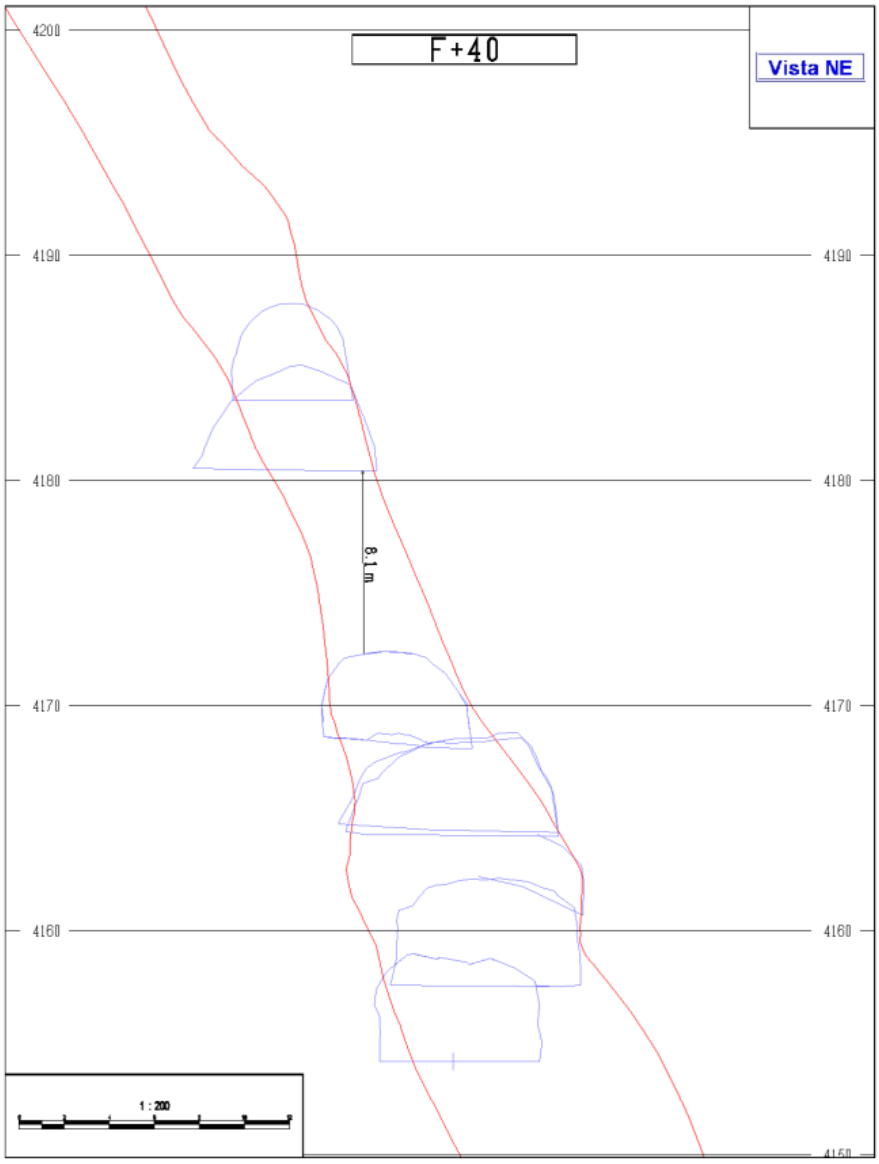
Sección transversal F+0



Nota. Sección transversal F+0.

La sección F+40, ubicada hacia el sector norte, muestra un incremento de la potencia de la veta y una mayor separación entre las labores existentes. A partir de las secciones topográficas se ha determinado una altura promedio del puente de aproximadamente 7,2 m. Esta dimensión constituye un parámetro importante para calcular el volumen recuperable, establecer la longitud de perforación y evaluar la estabilidad de los paneles y pilares considerados en el diseño.

Figura 9
Sección transversal F+40



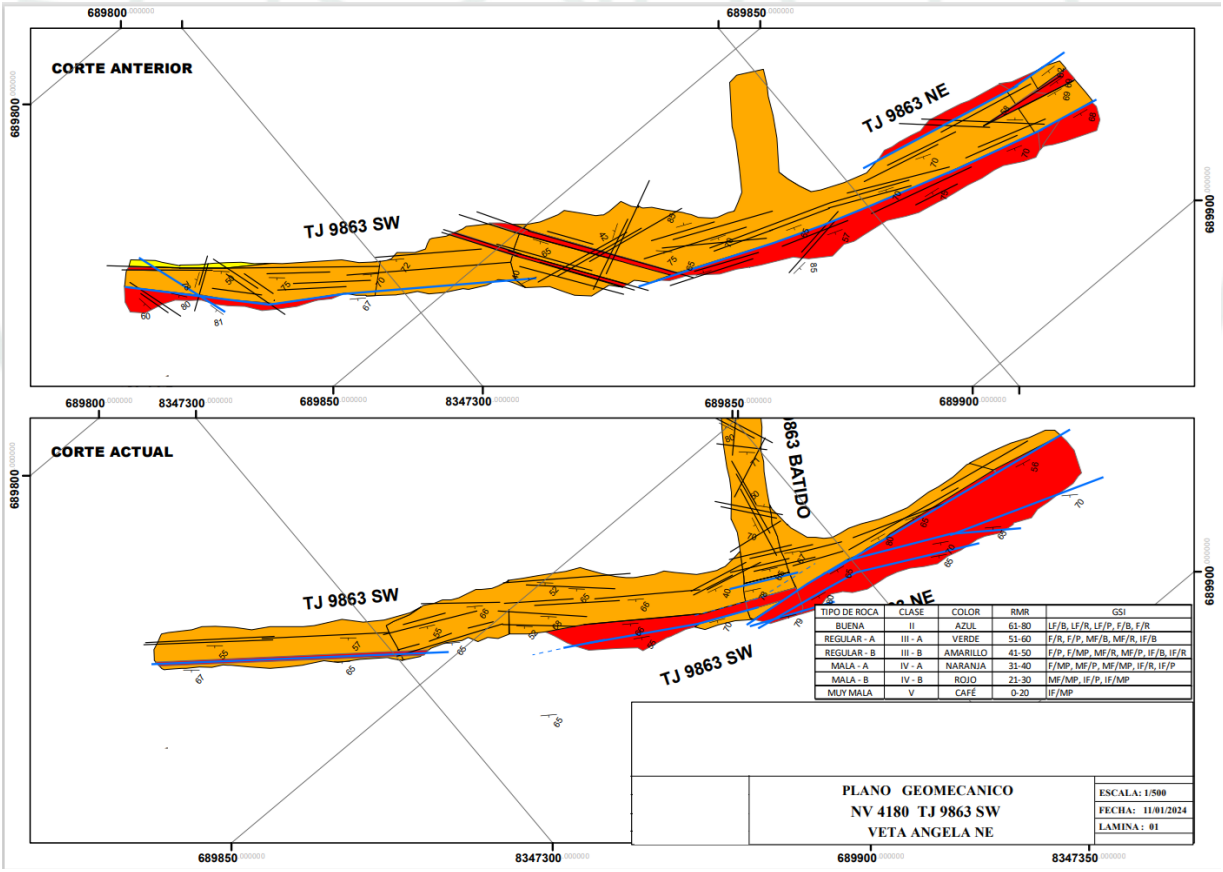
Nota. Sección transversal F+40.

3.9 Planos geomecánicos

El plano geomecánico del bloque inferior, correspondiente al TJ 9863 SW y los subniveles 4 y 5, muestra la distribución de la calidad del macizo rocoso a lo largo de la veta. Hacia el sector sur predomina la roca tipo IVA, mientras que hacia el norte se incrementa la presencia de roca tipo IVB. Esta variación indica un deterioro progresivo de la calidad geomecánica hacia el norte, donde el macizo presenta menor resistencia y una mayor influencia de discontinuidades. Por lo tanto, este sector requiere mayores controles de sostenimiento, perforación y voladura.

Figura 10

Plano geomecánico NV 4180 TJ 9863 SW



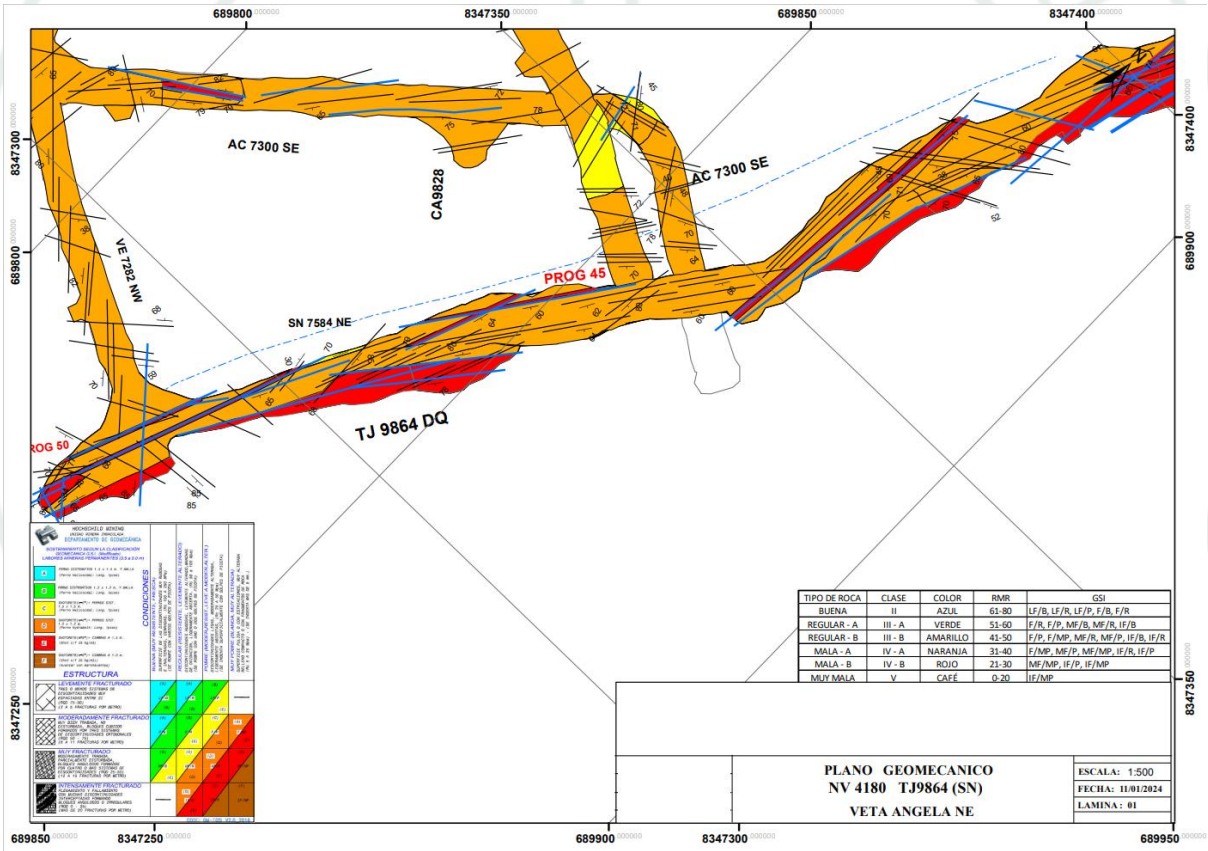
TIPO DE ROCA	CLASE	COLOR	RMR	GSI
BUENA	II	AZUL	61-80	LF/B, LF/R, LF/P, F/B, F/R
REGULAR - A	III - A	VERDE	51-60	F/R, F/P, MF/B, MF/R, IF/B
REGULAR - B	III - B	AMARILLO	41-50	F/P, F/MP, MF/R, MF/P, IF/B, IF/R
MALA - A	IV - A	NARANJA	31-40	F/MP, MF/P, MF/MP, IF/R, IF/P
MALA - B	IV - B	ROJO	21-30	MF/MP, IF/P, IF/MP
MUY MALA	V	CAFÉ	0-20	IF/MP

Nota. Plano geomecánico NV 4180 TJ 9863 SW veta Ángela NE.

El plano del bloque superior, correspondiente al TJ 9864 y al subnivel 1, permite reconocer la continuidad de las zonas de roca de calidad pobre alrededor de la veta Ángela NE. La presencia de sectores clasificados como IVA y IVB evidencia un macizo rocoso fracturado y condicionado por estructuras geológicas. Estas características pueden disminuir la capacidad de confinamiento de las cajas y afectar el comportamiento del relleno cementado expuesto durante la recuperación. El plano también permite identificar las zonas donde deberá reforzarse el sostenimiento y reducirse la exposición abierta.

Figura 11

Plano geomecánico NV 4180 TJ 9864 SW



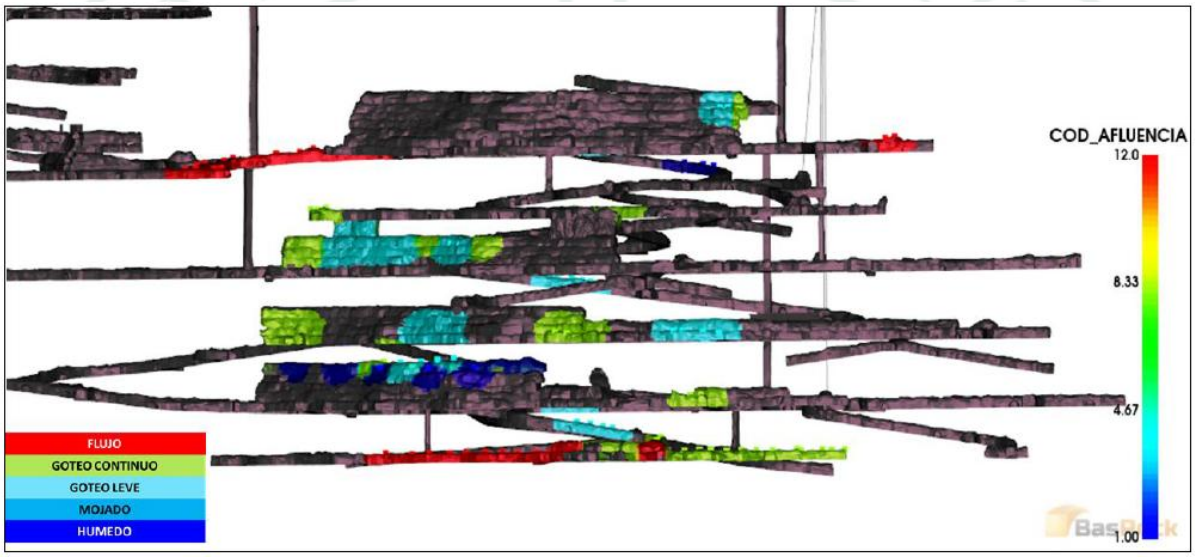
Nota. Plano geomecánico NV 4180 TJ 9864 SW veta Ángela NE.

3.10 Análisis técnico de factores influyentes

3.10.1 Afluencia y presión de drenaje de agua

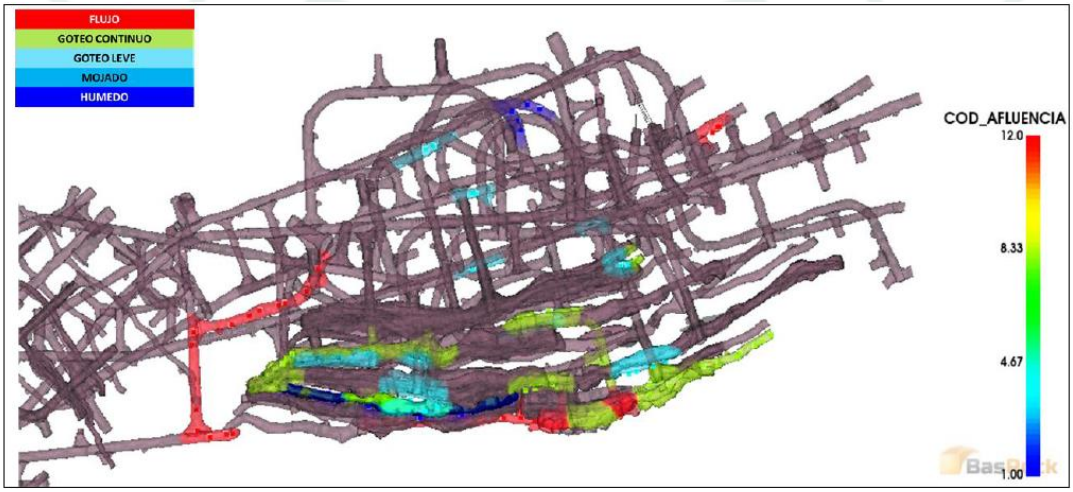
Se realiza una geo-referencia de las áreas donde se presentó drenaje de agua en la secuencia de minado, el tipo de afluencia se da de acuerdo con la clasificación geomecánica RMR, se detalla:

Figura 12
Vista longitudinal de drenaje de agua en veta Ángela NE



Nota. Drenaje de agua vista longitudinal secuenciado, flujo, goteo continuo, gateo leve, mojado, húmedo.

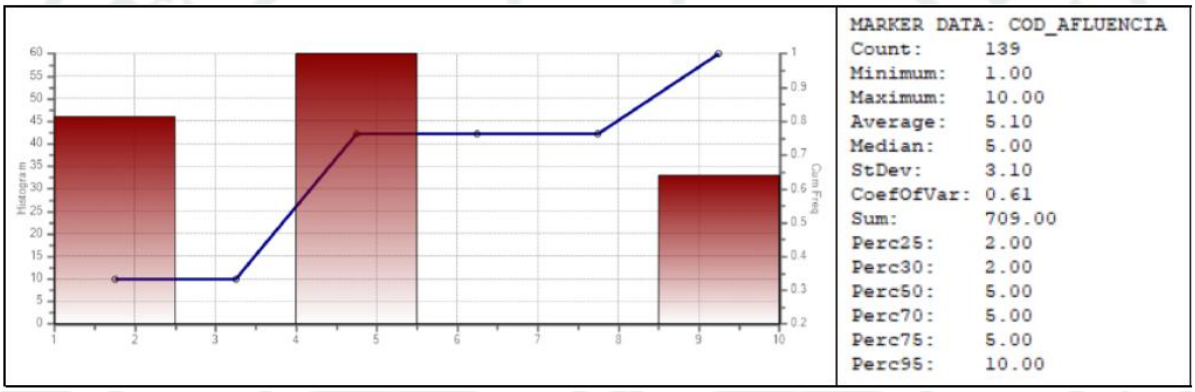
Figura 13
Vista en planta de drenaje de agua en veta Ángela NE



Nota. Drenaje de agua vista de planta secuenciado, flujo, goteo continuo, gateo leve, mojado, húmedo.

Como se observa la veta Ángela NE presenta una irregularidad con respecto al drenaje de agua, las zonas donde se ha presentado como flujo han sido en el nivel de acceso a la veta, en la zona ubicada al NE y la zona de profundización, relacionado principalmente a las fallas estructurales y fallas mineralizadas.

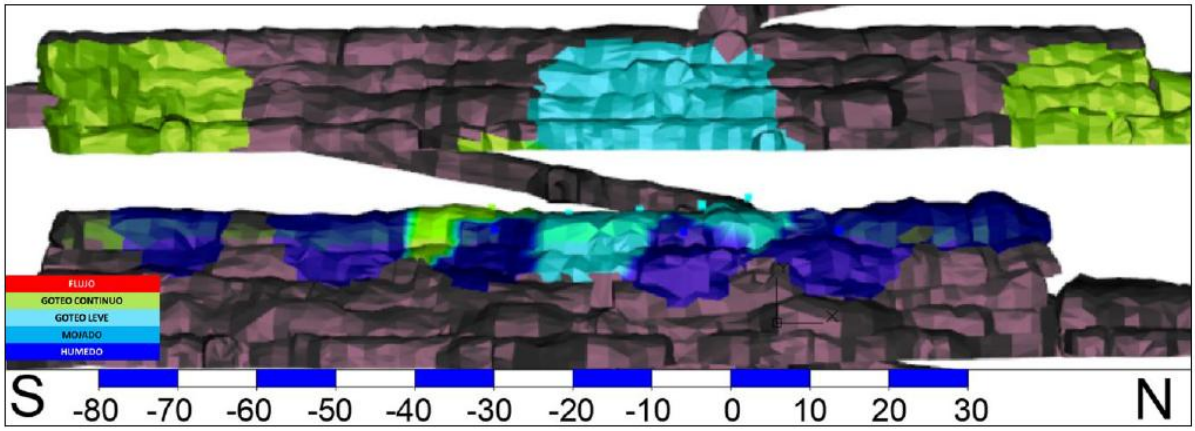
Figura 14
Estadística de drenaje de agua en veta Ángela NE



Nota. Data de afluencia de fujo de agua, máximo y mínimo.

El tipo de afluencia y presión promedio es de goteo (4-5) leve a continuo, con una alta probabilidad de cortar zonas de flujo dado que aún no se tiene reconocido el nivel freático.

Figura 15
Goteo leve a continúo



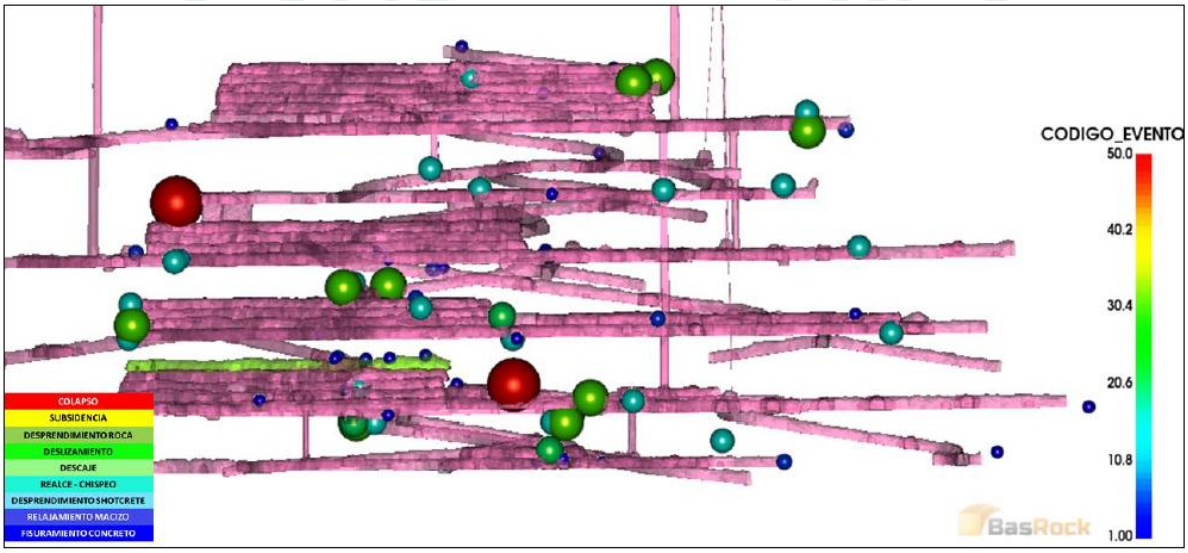
Nota. Goteo leve continuo histórico.

3.10.2 Eventos de inestabilidad

Se realiza una geo-referencia de las áreas donde se presentaron eventos de inestabilidad, estos asociados a factores influyes tales como esfuerzos inducidos, discontinuidades principales y drenaje de agua, se detalla:

Figura 16

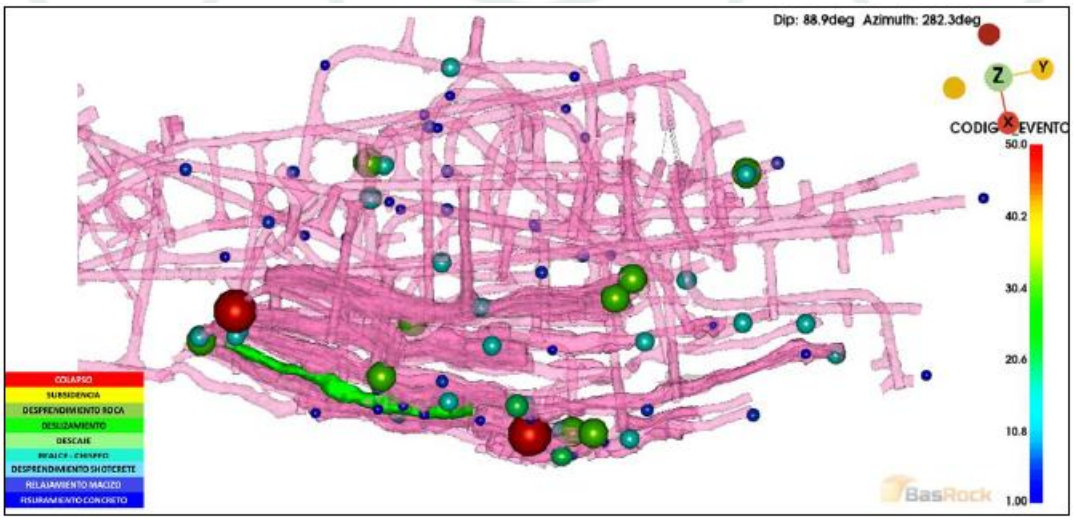
Vista longitudinal de eventos de inestabilidad en veta Ángela NE



Nota. Vista longitudinal de eventos, colapso, subsidencia, desprendimiento roca, deslizamiento, descaje, realce – chipe, desprendimiento shotcrete, relajamiento macizo, fisuramiento concreto.

Figura 17

Vista en planta de eventos de inestabilidad en veta Ángela NE

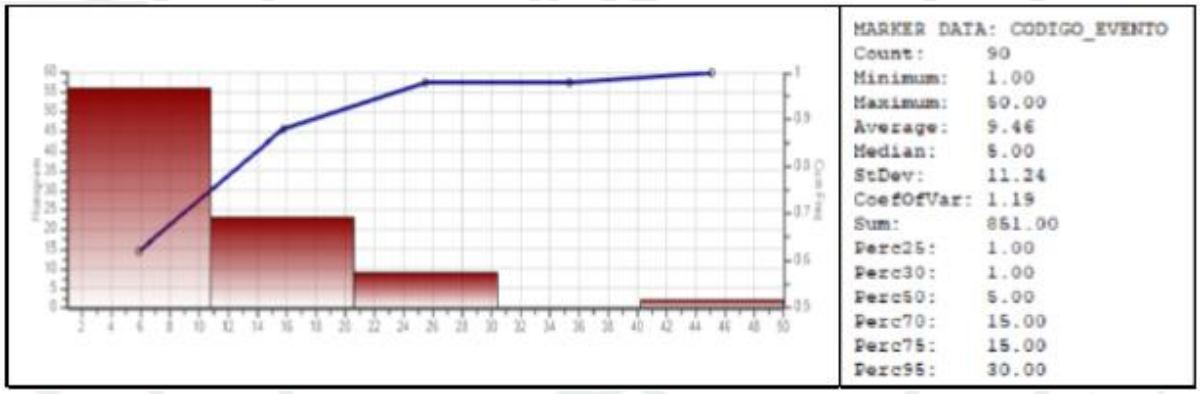


Nota. Vista en planta de eventos, colapso, subsidencia, desprendimiento roca, deslizamiento, descaje, realce – chipe, desprendimiento shotcrete, relajamiento macizo, fisuramiento concreto.

Como se observa la veta Ángela NE presenta una gran cantidad de eventos de inestabilidad, siendo una veta compleja para su minado dado que los factores influyentes alcanzan rangos críticos tales como flujos de agua, alta deformación que han ocasionado colapsos, desprendimientos de roca asociados a realces y un relajamiento continuo del macizo rocoso.

Figura 18

Estadística de eventos de inestabilidad

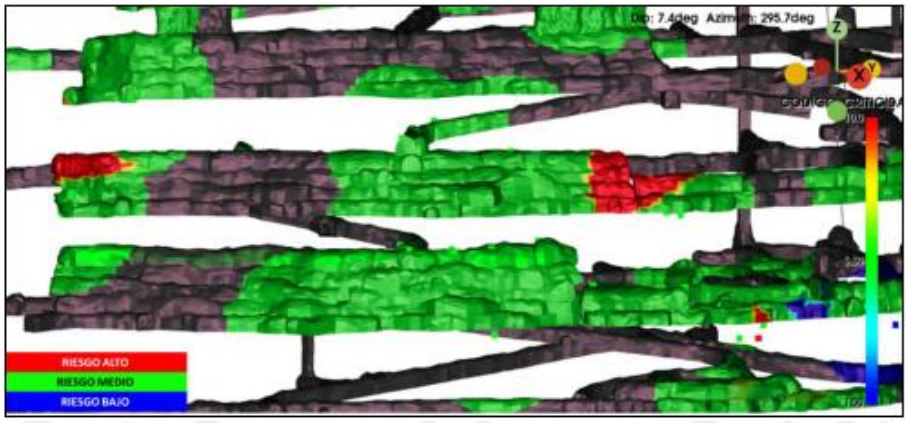


Nota. Data de eventos de inestabilidad, mínimo y máximo.

En una valorización personalizada de los eventos, el mayor porcentaje está relacionado al relajamiento de macizo rocoso (placas de pernos hundidas, malla sobrecargada) y fisuramiento de concreto prematuro, presentándose inclusive a pocos días.

Figura 19

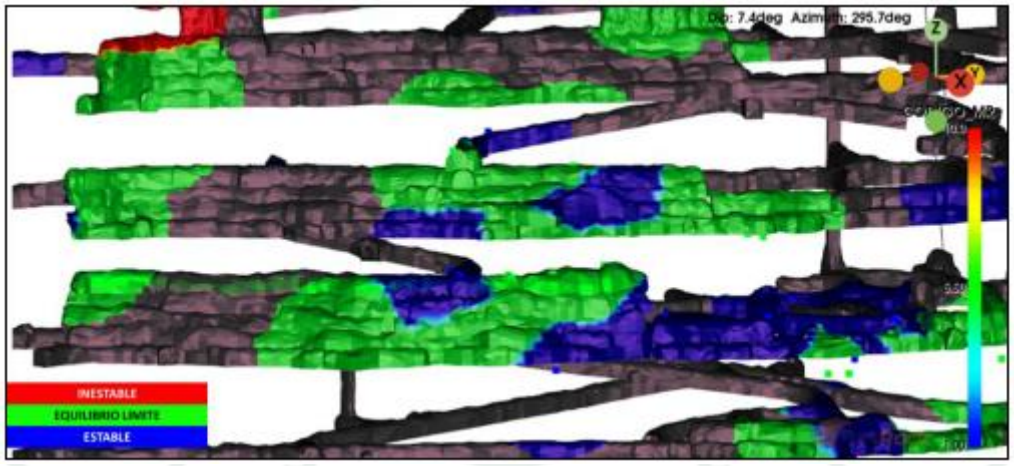
Condición de riesgo N y S



Nota. Condición de riesgo con respecto a la zona de recuperación, los extremos N y S presentan una condición de riesgo alta aledaña tal como se observa en el bloque de minado superior.

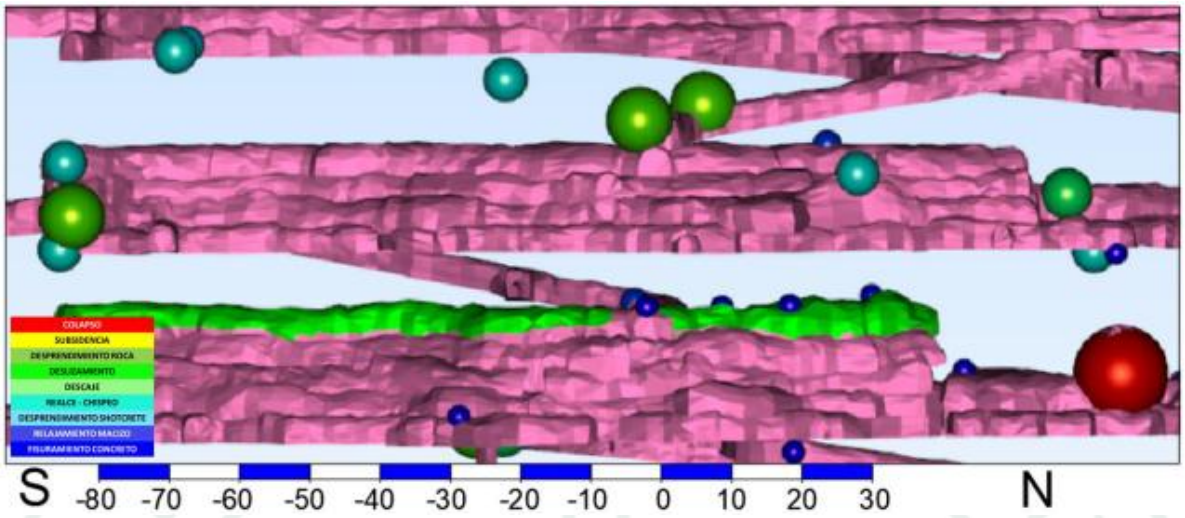
Figura 20

Condición de estabilidad N y S



Nota. Condición de estabilidad, con respecto a la zona de recuperación, los extremos N y S presentan una condición de equilibrio límite, es decir se tuvo complejidad en su estabilidad al desarrollar el minado.

Figura 21
Fisuramiento de concreto



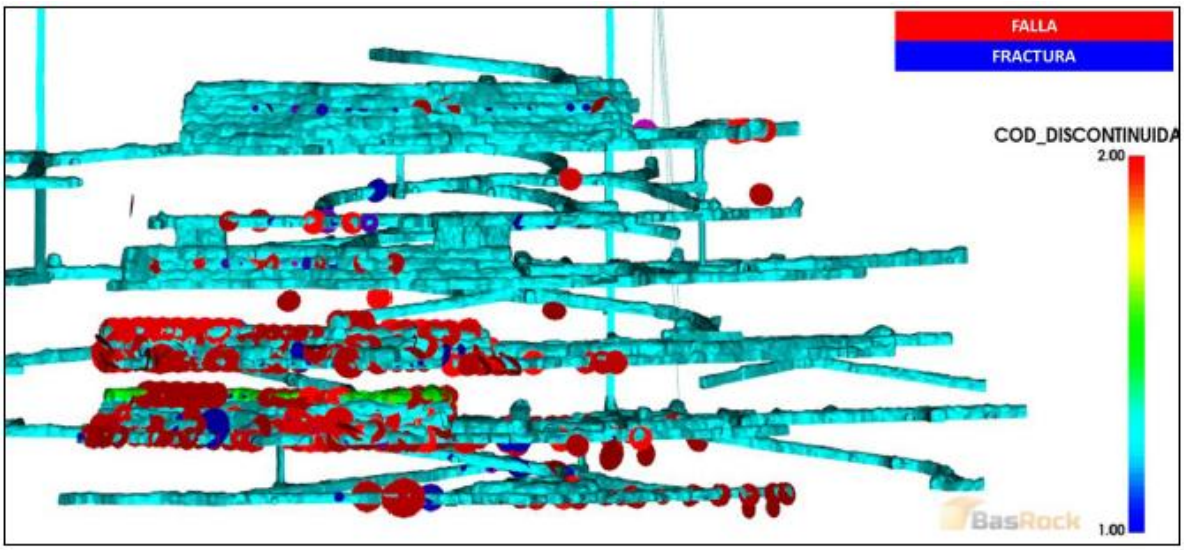
Nota. Como se observa desde la intersección hasta la progresiva 30 hacia el ala N presenta un fisuramiento de concreto con una persistencia promedio de 2 a 3 m y una abertura entre 0.5 y 1 cm, debemos tomar en cuenta este tipo de comportamiento del sostenimiento considerando que cercano a esta zona se tuvo un evento de colapso en intersección.

3.10.3 Condición estructural

Se realiza una geo-referencia de todas las fracturas y fallas mapeadas, así como proyectadas en los planos geomecánicos, como se observa a partir del Nv 4200 hacia cotas inferiores predominan las fallas mineralizadas y estructurales.

Figura 22

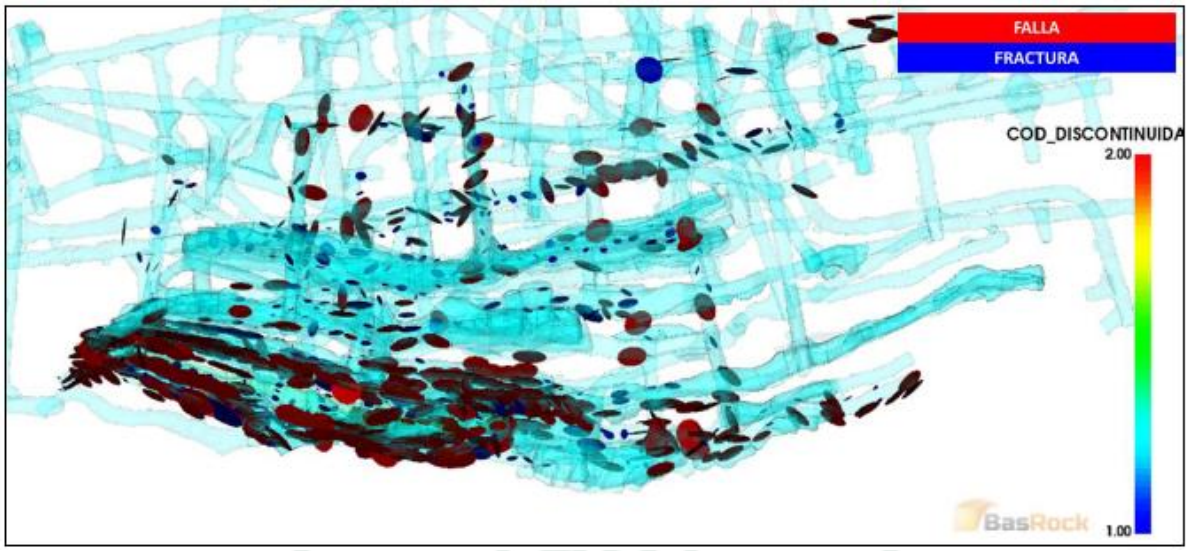
Vista longitudinal de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE



Nota. Vista longitudinal de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE, código de discontinuidad falla y fractura.

Figura 23

Vista en planta de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE



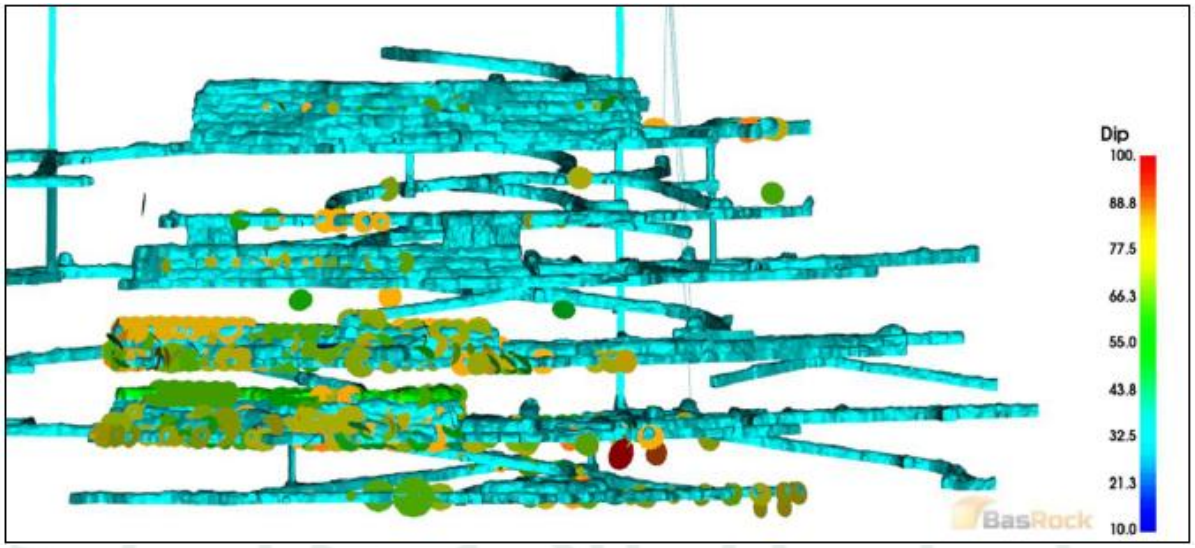
Nota. Vista en planta de proyección de discontinuidades en veta Ángela NE, código de discontinuidad falla y fractura.

Como se observa la veta Ángela NE presenta una condición estructural compleja, en la zona de mineralización la tendencia de orientación es paralela al avance y en la zona de

desarrollo y preparación se observa una tendencia de orientación perpendicular al avance, así mismo la persistencia de dichas discontinuidades supera los 20 m.

Figura 24

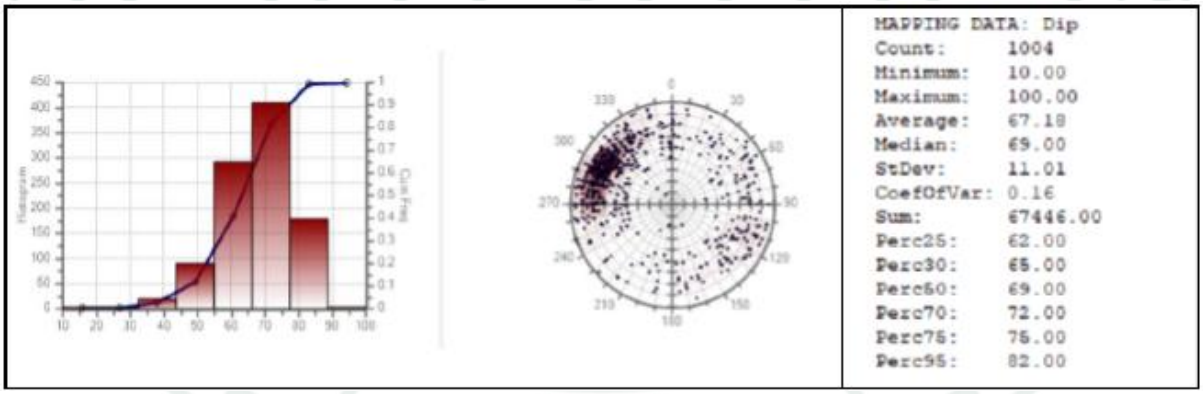
Isovalores por buzamiento de discontinuidad en veta Ángela NE



Nota. Isovalores por buzamiento de discontinuidad en veta Ángela NE niveles de Dip.

Figura 25

Estadística de orientación y buzamiento de discontinuidades en veta Ángela NE

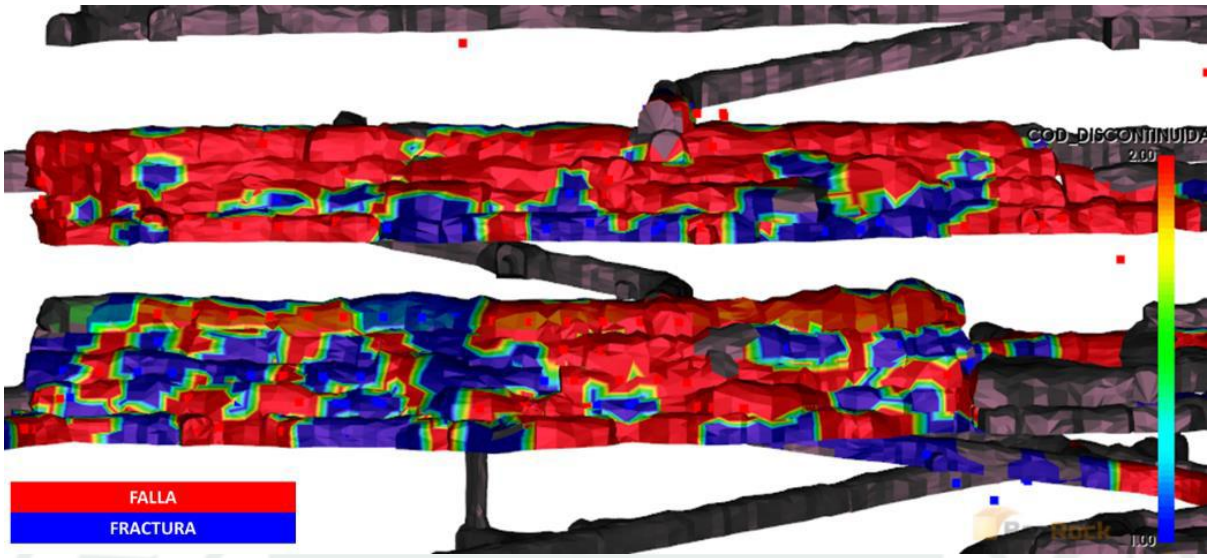


Nota. Orientación y buzamiento de discontinuidades, Dip.

El rango promedio de buzamiento se presenta entre 60° y 70°, con un azimut entre 300° y 310°, paralelo a la estructura mineralizada.

Figura 26

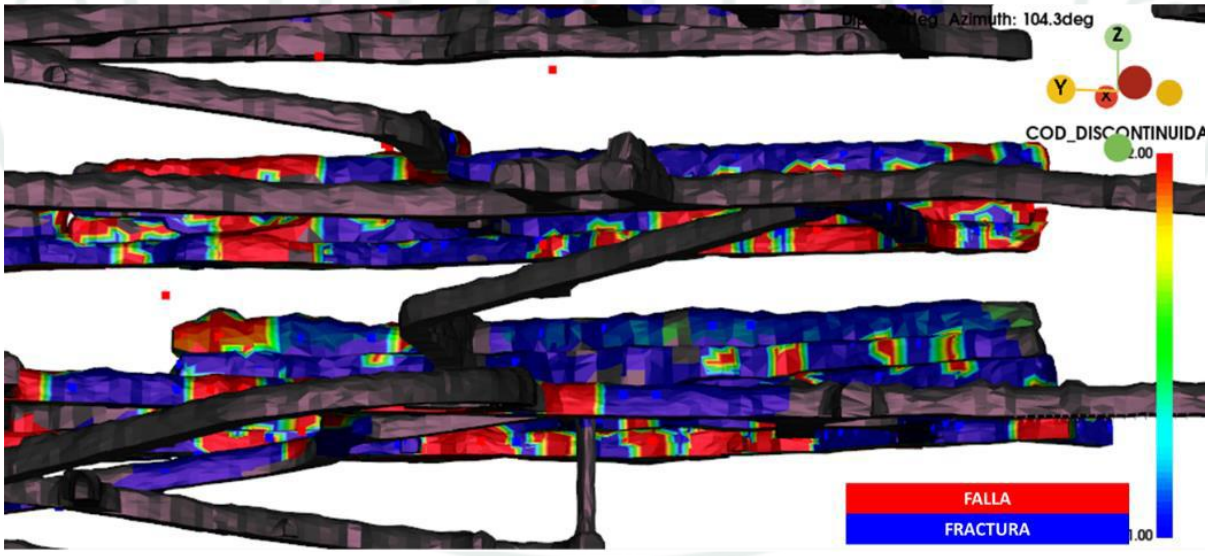
Isovalores de discontinuidad en CT



Nota. Isovalores de discontinuidad en CT, con respecto a la zona de recuperación, desde la intersección hasta el tope del ala N predominan fallas que alteran la calidad de roca, con una zonificación entre roca de tipo IVB y V.

Figura 27

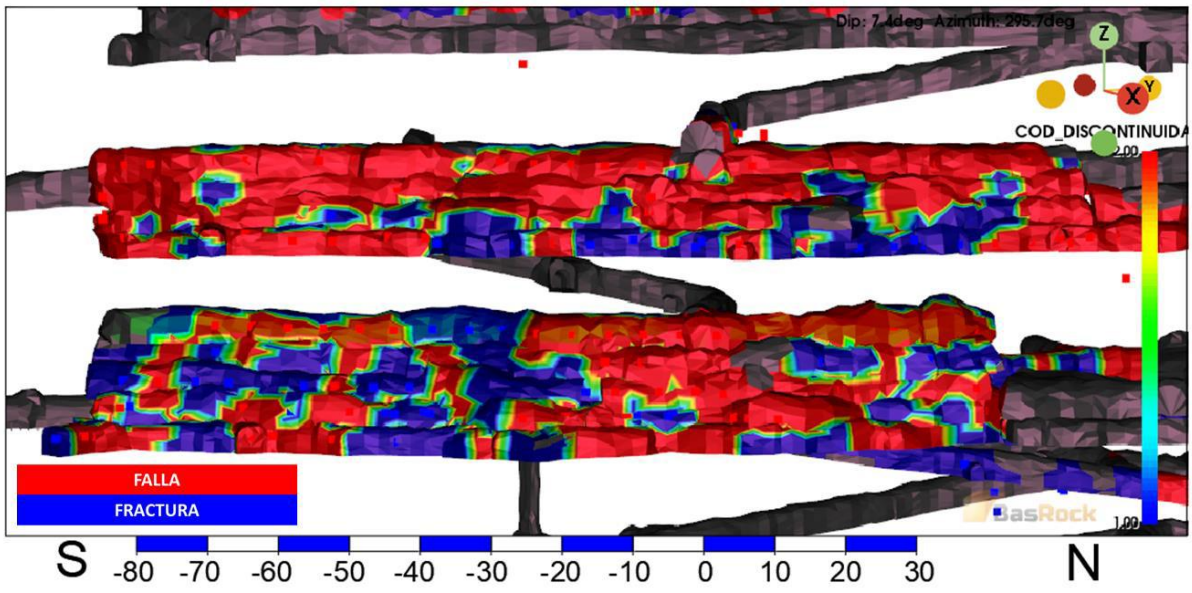
Isovalores de discontinuidad en CP



Nota. Isovalores de discontinuidad en CP**,** con respecto a la zona de recuperación, solo se observa en los últimos 15 m del ala N la continuidad de alteración presentada en CT, esto debido a la orientación paralela y persistencia de fallas.

Figura 28

Isovalores de discontinuidad con alta influencia de fallas

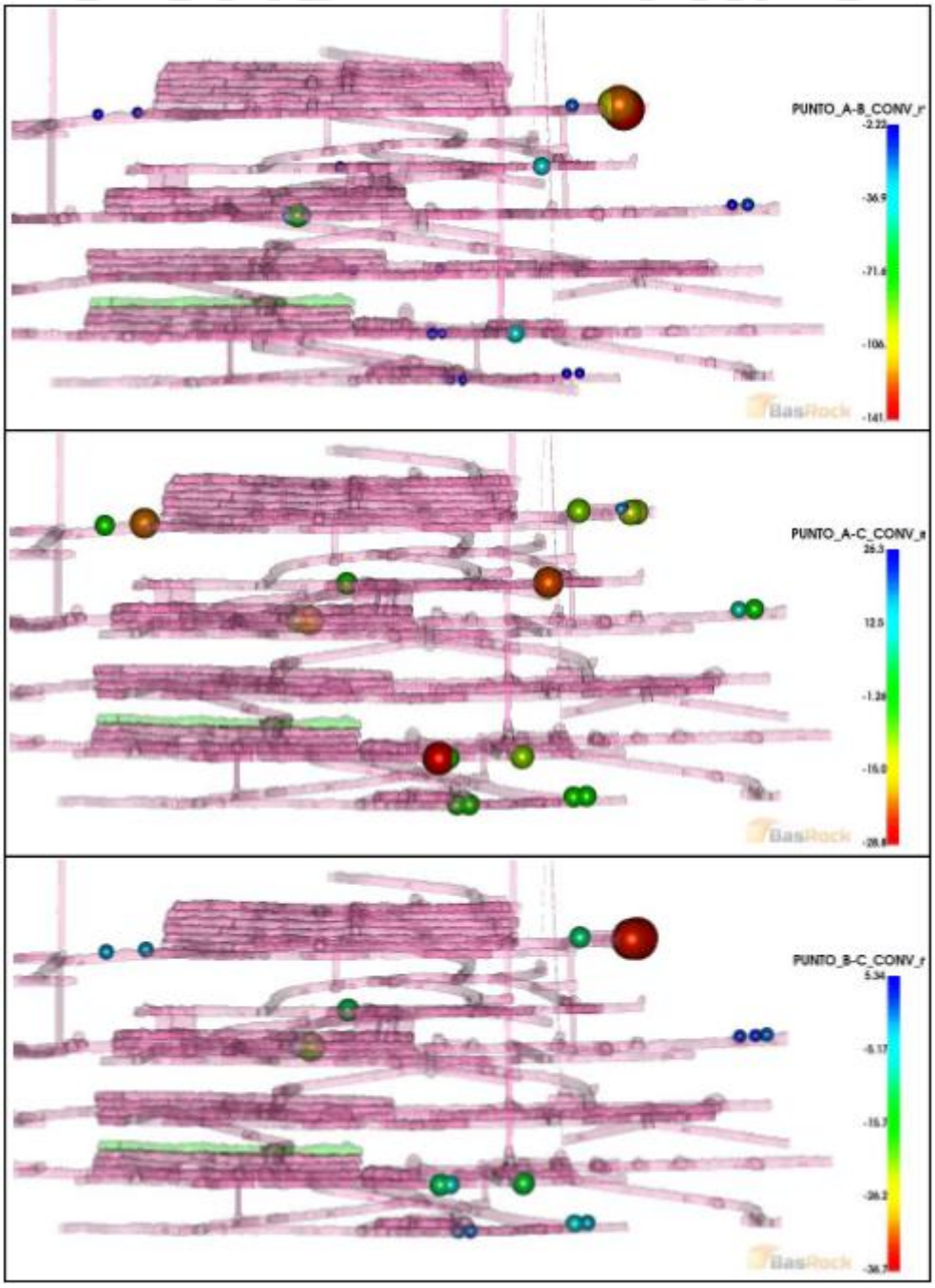


Nota. Como se observa entre las progresivas -30 y 30 se observa un área con alta influencia de fallas, debemos tomar en cuenta esta sectorización dado que aún no se ha identificado con exactitud la potencia y halos de influencia de fallas tipo contacto.

3.10.4 Condición de deformación

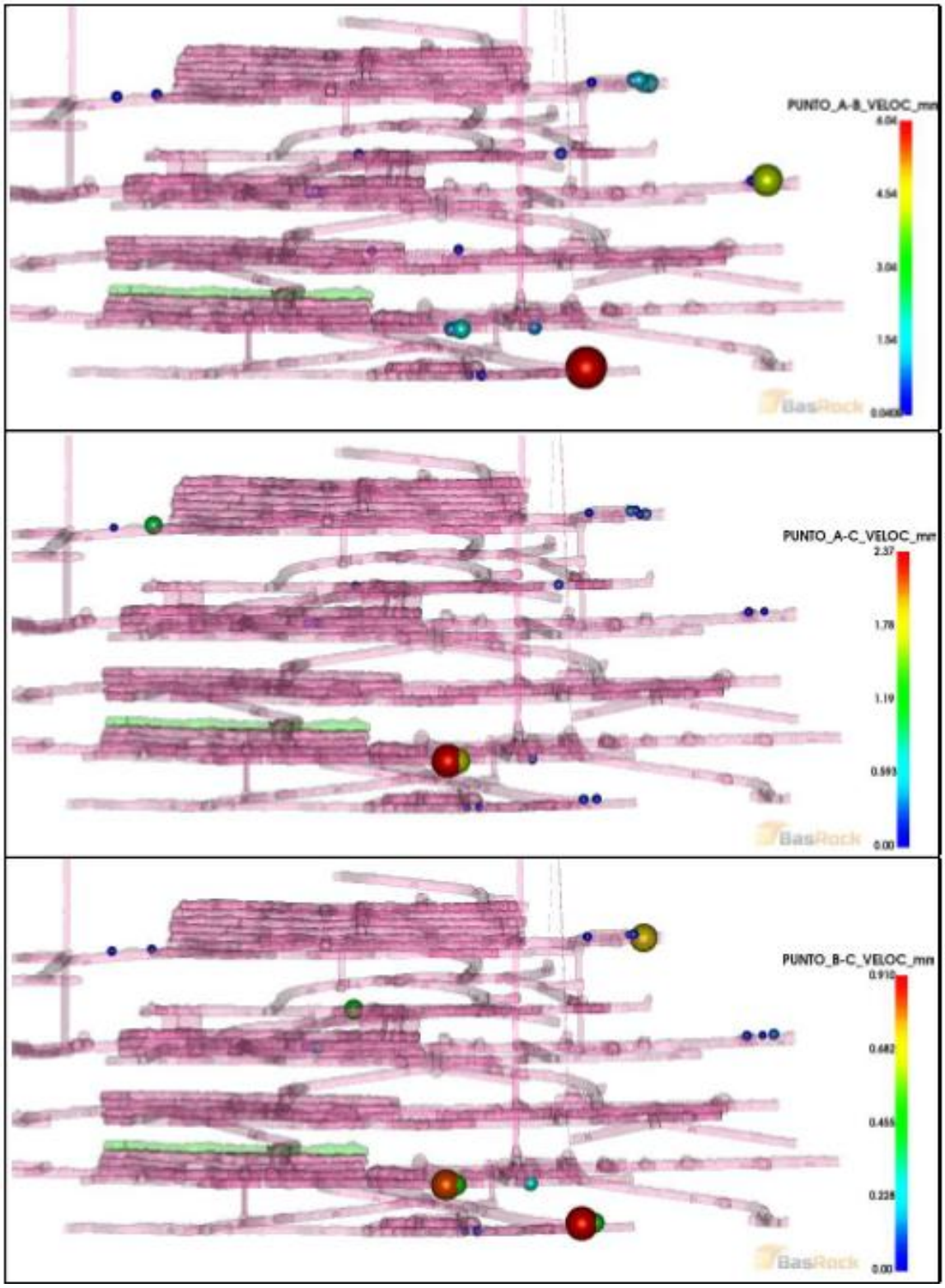
Para este análisis se han considerado 10 estaciones de monitoreo de convergencia, dichos puntos tienen como antecedente una alta deformación y/o relajamiento de la fortificación tanto activa como pasiva, se detalla:

Figura 29
Análisis de convergencia (mm)



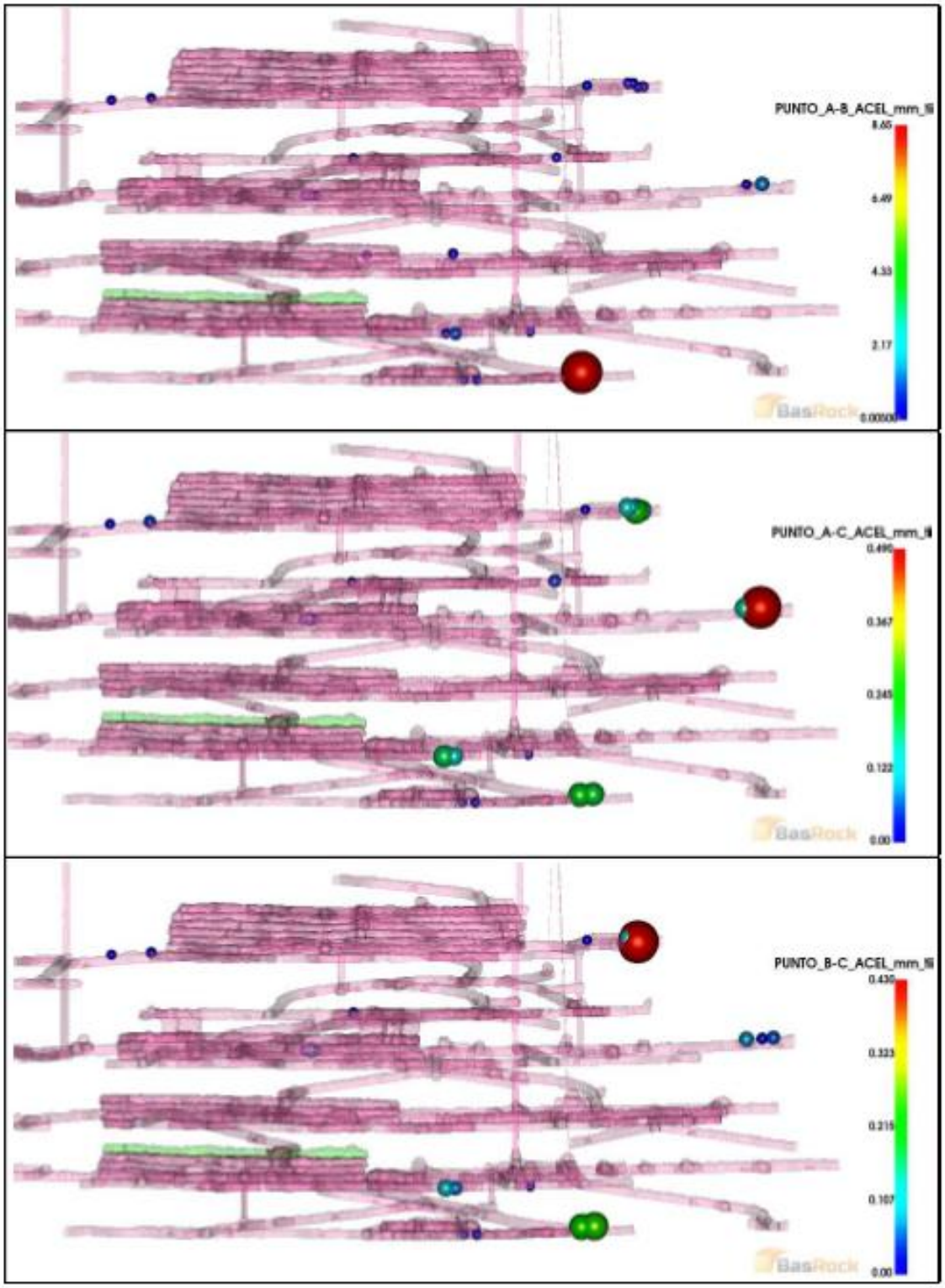
Nota. Puntos de convergencia (mm).

Figura 30
Análisis de velocidad (mm/ día)



Nota. Puntos de velocidad (mm/ día).

Figura 31
Análisis de aceleración

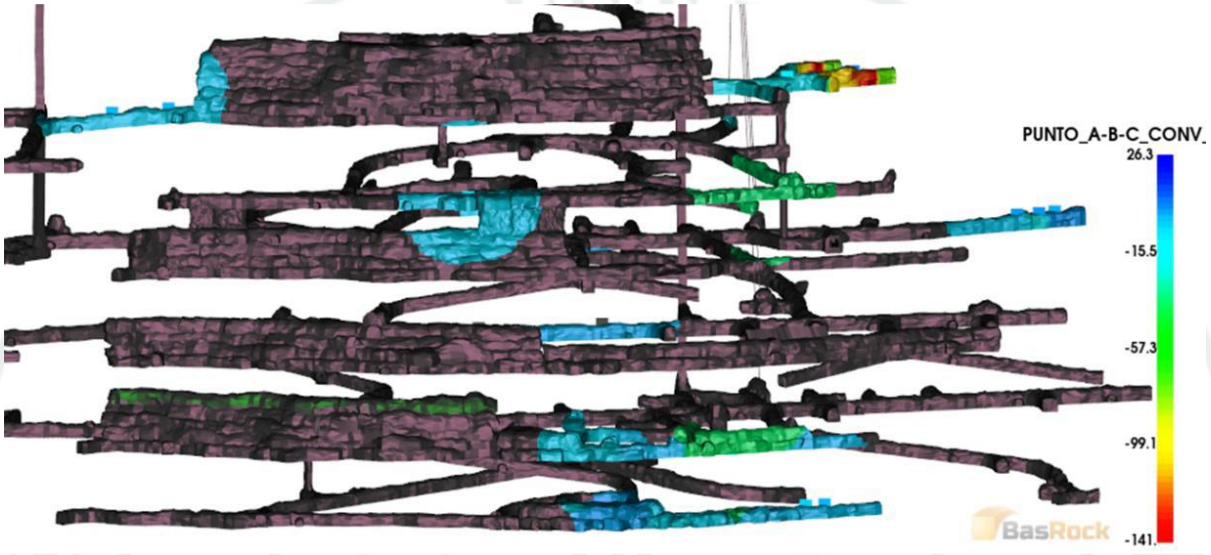


Nota. Puntos de aceleración

3.10.5 Resumen de análisis

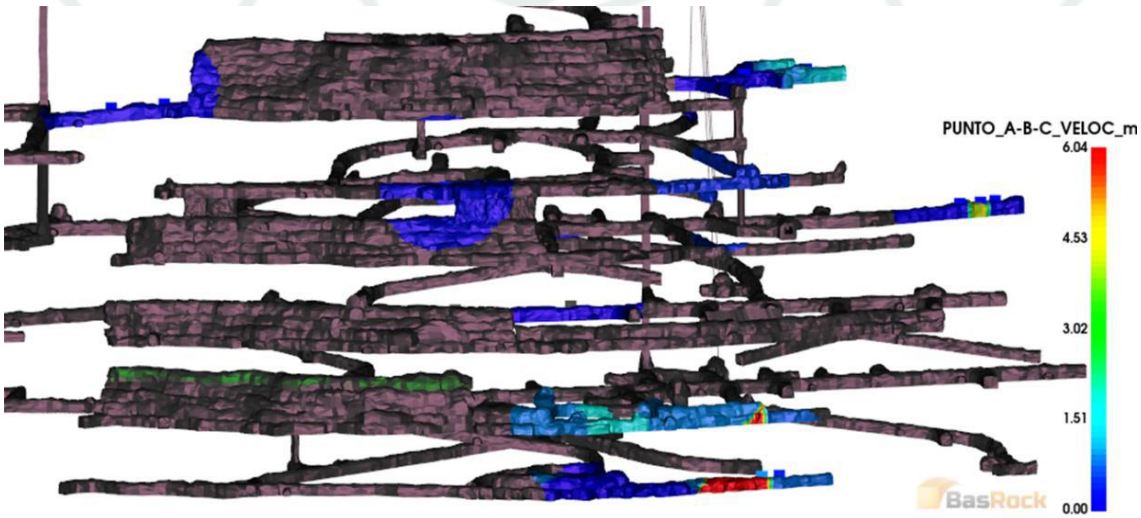
Considerando todos los monitoreos realizados, se proyecta un plano de isovalores para analizar el comportamiento de deformación de la zona a recuperar.

Figura 32
Convergencia punto A-B-C



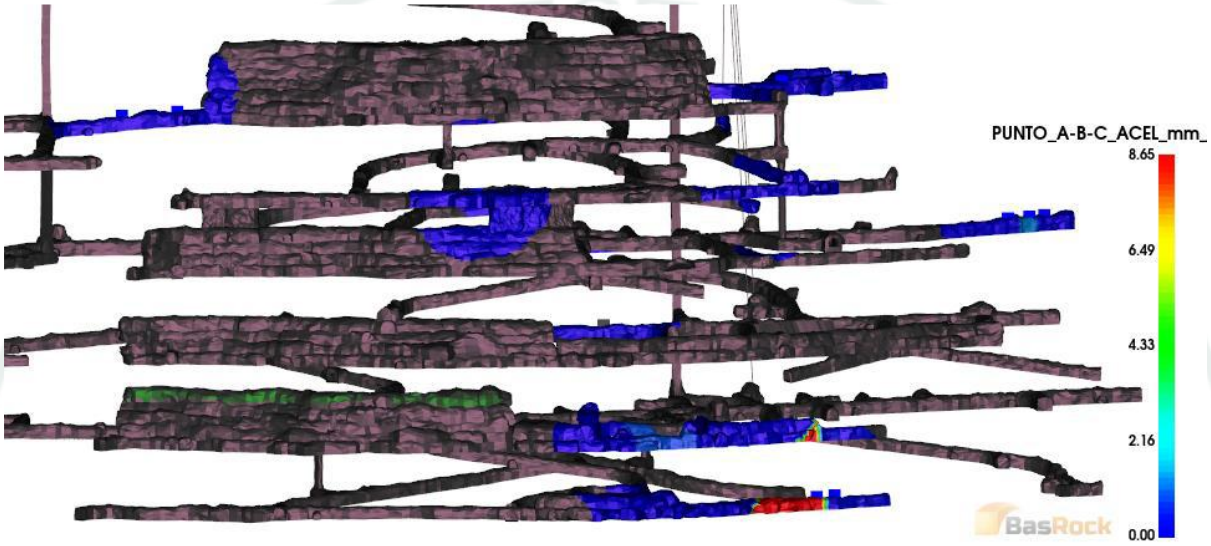
Nota. El valor de convergencia más cercano a la zona de recuperación es de -15 mm, siendo un rango medio, a medida que se avanza hacia el ala N el valor incrementa significativamente, debiéndose tomar en cuenta en caso en la secuencia de recuperación se presente un alto grado de relajamiento en el sostenimiento.

Figura 33
Velocidad punto A-B-C



Nota. El valor de velocidad más cercano a la zona de recuperación es de 1 mm/ día, siendo un rango medio, a medida que se avanza hacia el ala N se alcanza 6 mm/ día, siendo una condición de riesgo.

Figura 34
Aceleración punto A-B-C

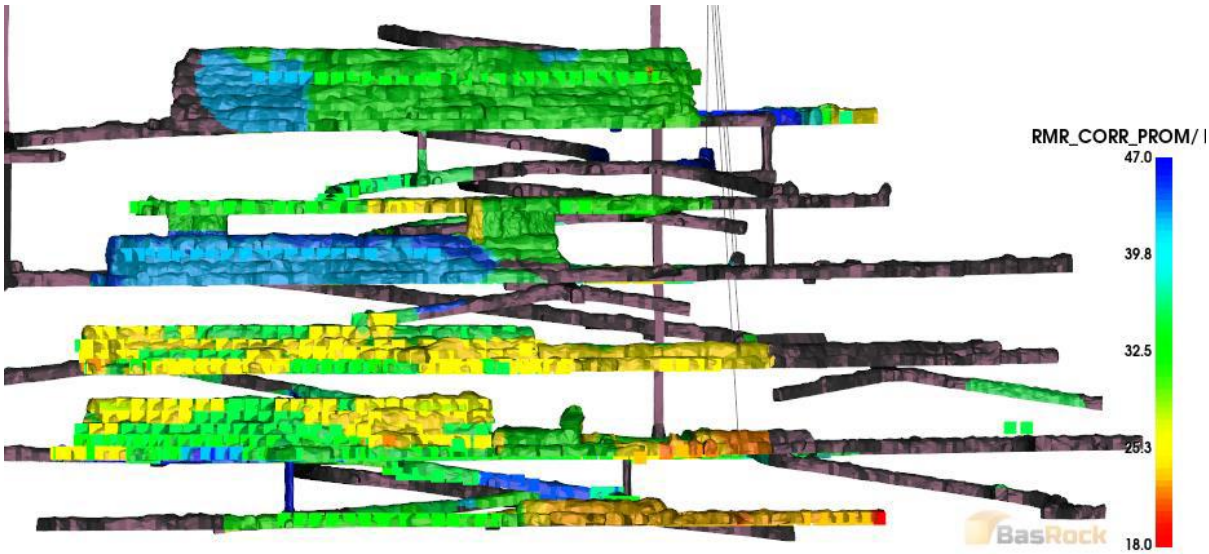


Nota. El valor de aceleración más cercano a la zona de recuperación es cercano a "0", esto nos indica que a pesar de poder alcanzar altos valores de velocidad su aceleración no incrementaba, a medida que se avanza hacia el ala N en la zona más profunda si se observó un alto rango de aceleración.

3.10.6 Zonificación Geomecánica

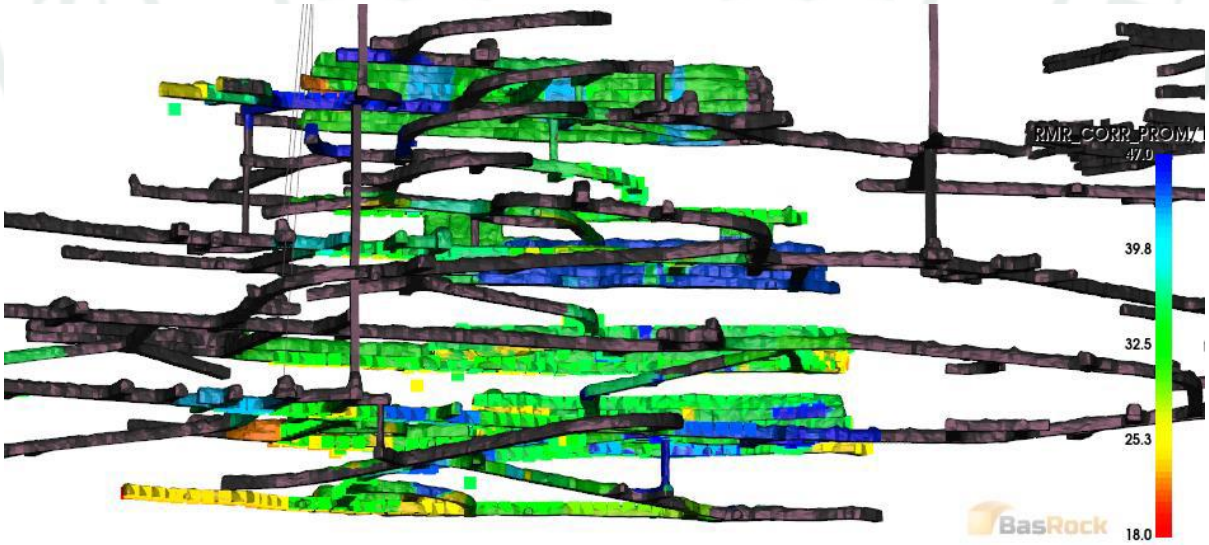
Se realiza una geo-referencia considerando el mapeo GSI y RMR detallado en los planos geomecánicos, se toma en cuenta la valoración del macizo rocoso en ventanas de cada 5 m, se detalla:

Figura 35
Zonificación caja techo



Nota. En la zona de recuperación, en el SN 9863 (bloque inferior) tanto en los extremos N y S la roca predominante es IVB (RMR: 25), en el SN 9864 (bloque superior) la roca presenta una calidad entre IVA y IVB, cabe señalar que a mejor calidad de roca la cohesión del relleno cementado presentará un mejor desempeño.

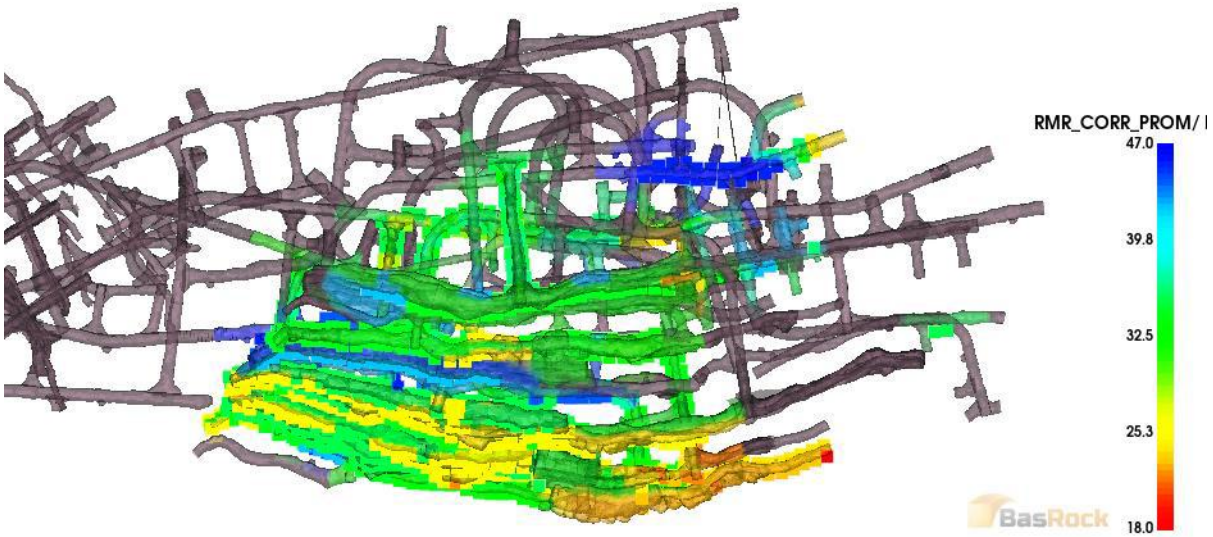
Figura 36
Zonificación caja piso



Nota. En la zona de recuperación, en el SN 9863 (bloque inferior) tanto en los extremos N y S la roca predominante es IVA (RMR: 35), en el SN 9864 (bloque superior) la roca presenta una calidad predominante IVA, se observa una mejora de calidad con referencia a la CT.

Figura 37

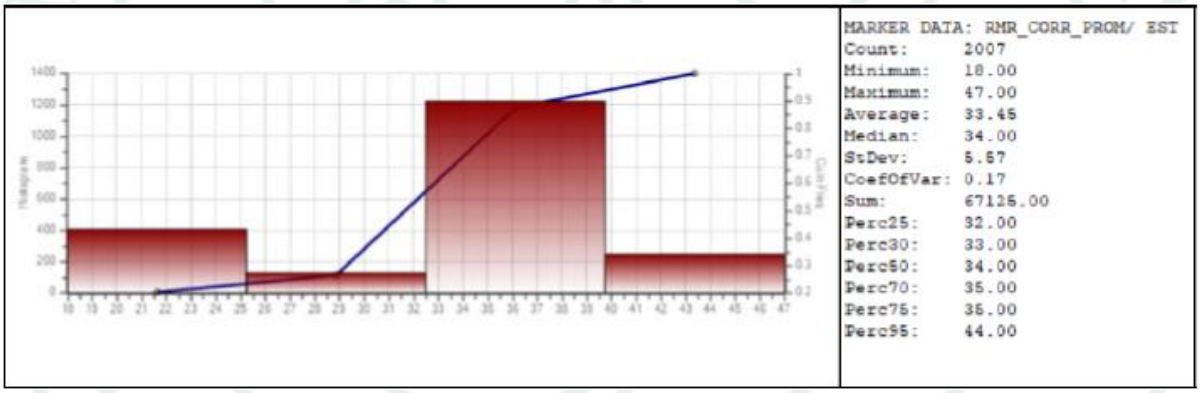
Vista en planta de zonificación RMR en veta Ángela NE



Nota. Vista en planta de zonificación RMR en veta Ángela NE, nivel promedio.

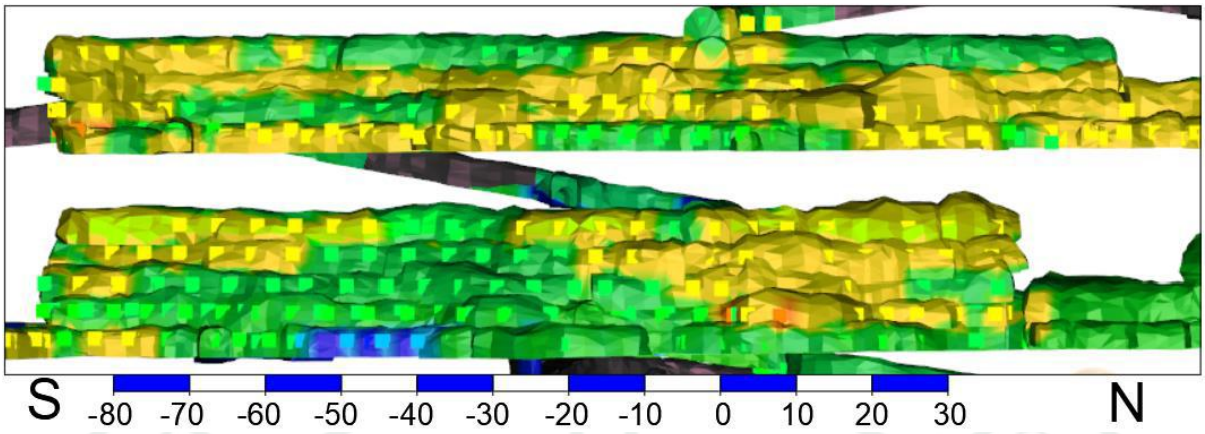
Figura 38

Estadística de la zonificación RMR en veta Ángela NE



Nota. De manera global de acuerdo con la base de datos de mapeo en el minado de la veta Ángela NE la roca predominante es de tipo IVA, seguido de IVB y V, siendo esta una condición superficial de pobre a muy pobre.

Figura 39
Zonificación RMR en veta Ángela S y N



Nota. Como se observa entre las progresivas -50 a -80 y de -30 a 30 se observa una calidad de mala de tipo IVB, así mismo en la base del bloque superior presenta la misma calidad de roca entre las progresivas -30 a -80; esta zonificación debe ser prioridad para la selección de tipo de malla a perforar y control de voladura.

3.10.7 Modelamiento de elementos de contorno

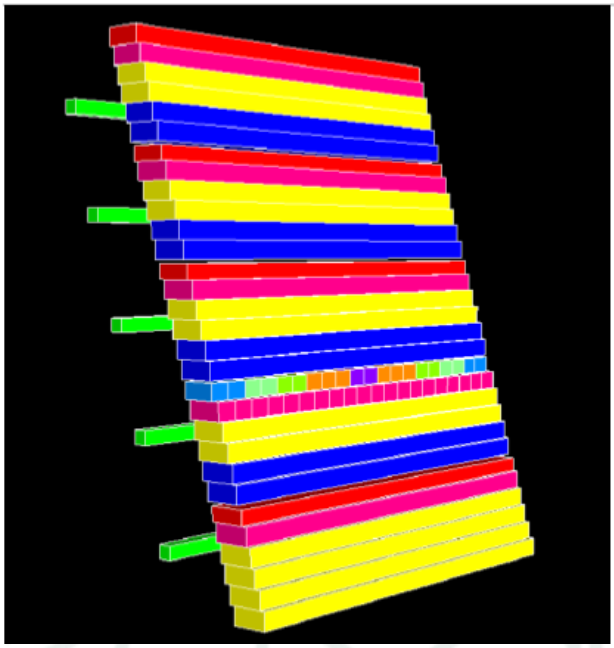
Se han considerado 3 escenarios con el objetivo de interpretar el comportamiento del macizo rocoso en el minado de recuperación SN_9863 NE – SW, así mismo determinar el comportamiento de la losa del relleno cementado frente a 3 tipos de SPAN: 6 m, 8 m y 10 m; cabe señalar que para esta evaluación se han considerado los siguientes parámetros con referencia a la roca predominante:

- Litología: Debris flow
- Calidad macizo rocoso: RMR: 30 tipo de roca IVB superior
- Esfuerzo Sigma 1 (horizontal): 18 Mpa
- Esfuerzo Sigma 3 (Vertical): 16 Mpa
- Sección SN: alto: 5 m/ ancho: 10 m

3.10.8 Escenario 01 – SPAN 06 m

Figura 40

Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 01



SUBNIVEL	
ANCHO MINADO (m)	10
ALTURA (m)	5

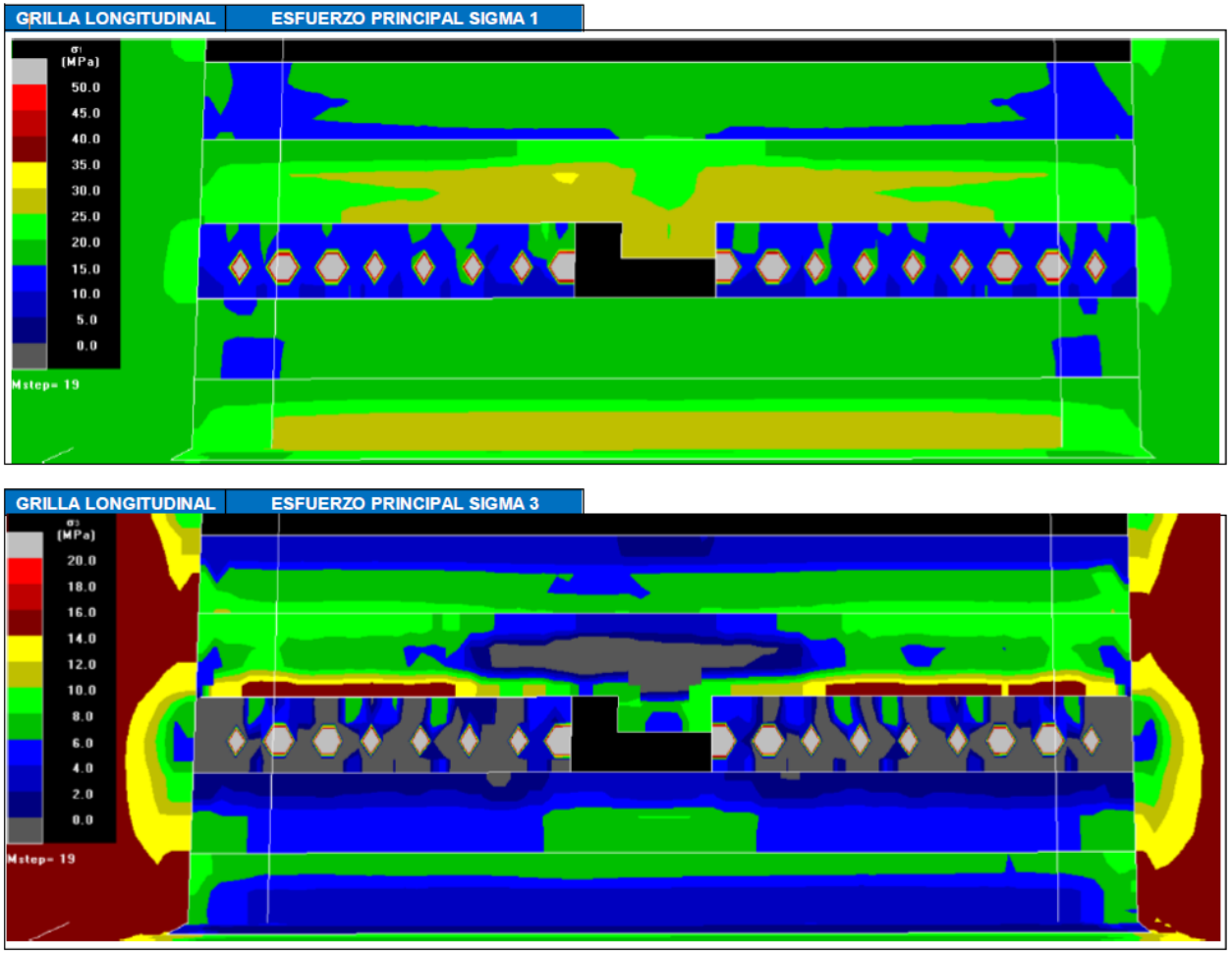
PUENTE RECUPERACION	
ALTURA (m)	4.5
ANCHO MINADO (m)	9
BLOQUES EVALUADOS	15
RIB PILLAR LONG.CT (m)	1
SILL PILLAR (m)	0.5

MODELAMIENTO	
STAGES	22
BLOQUES EVALUADOS	20
SPAN (m)	6
SECUENCIA MINADO INTERCALADO N - S	

Nota. El primer escenario contempla paneles de minado de 6 m de SPAN, dentro del modelamiento se consideran 3 parámetros: esfuerzo 1 (esfuerzo principal), esfuerzo 3 (desconfinamiento) y factor de seguridad. Para este caso se han considerado 22 stages con el objetivo de simular la secuencia de minado en su totalidad y observar el comportamiento tanto del puente como de la losa, se considera relleno en pasta posterior al minado de panel de recuperación.

Figura 41

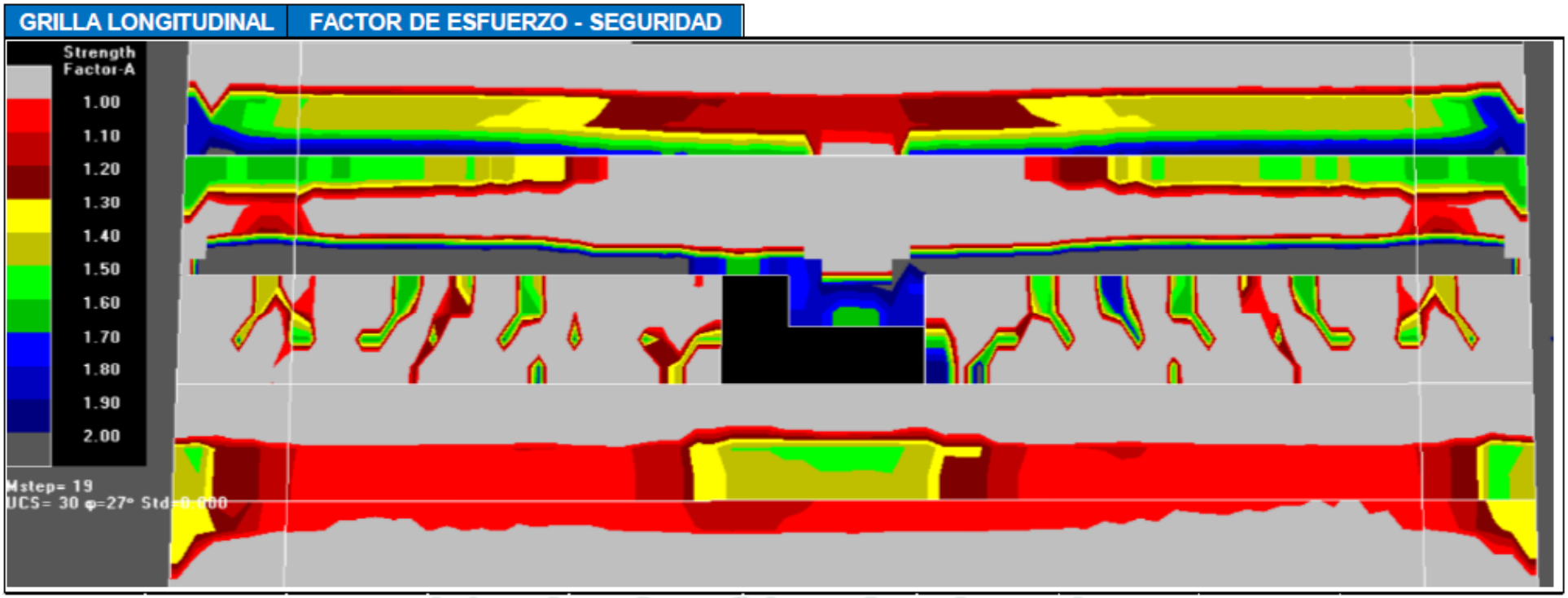
Análisis de modelamiento en grilla longitudinal esfuerzo sigma 1 y sigma 3



Nota. Modelamiento en grilla longitudinal esfuerzo sigma 1 y sigma 3

Figura 42

Análisis de modelamiento en grilla longitudinal factor de esfuerzo - seguridad



Nota. Modelamiento en grilla longitudinal factor de esfuerzo – seguridad.

Tabla 2

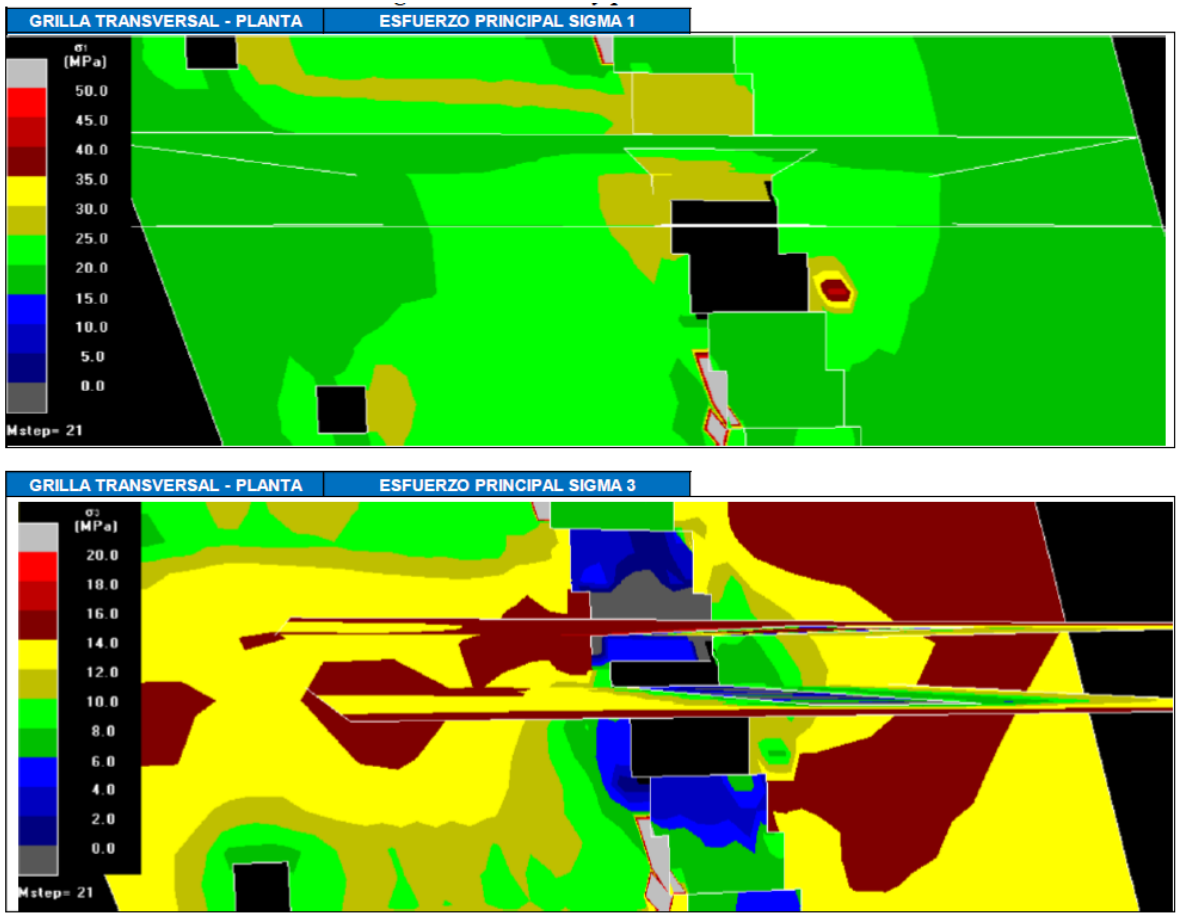
Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Bloque 13	Bloque 14	Bloque 15	Bloque 16	Bloque 17	Bloque 18	Bloque 19	Bloque 20
Ala	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	INTERSEC	INTERSEC
Esfuerzo 1 (Mpa)	25	25	35	35	30	30	30	35	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35
Halo influencia	6.62	6.07	5.92	5.48	6.08	6	7.71	5.87	8.48	8.72	9.6	9.13	8.23	7.88	7.91	8.09	7.65	8.14	8.79	6.49
Esfuerzo 3 (Mpa)	8	8	4	4	4	6	8	6	6	6	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
Halo influencia	5.18	4.84	4.36	3.95	4.71	5.02	4.78	4.64	7.22	7.39	6.77	6.81	4.02	4.43	4.88	5.46	5.49	5.04	5.16	5.48
Factor de seguridad	1.2	1.2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
Halo influencia losa	2.15	0.72	7.78	7.75	7.18	7.45	7.94	0.96	0.63	0.58	0.49	0.51	0.75	2.7	2.62	2.85	2.53	2.57	2.58	2.41
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4
Halo influencia puente	0.88	0.91	4.24	3.81	2.45	2.74	3.08	3.1	4.39	4.27	1.97	1.96	3.7	2.41	2.82	2.73	2.77	2.36	1.55	2.32

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en la grilla longitudinal con el objetivo de determinar el secuenciamiento más óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

Figura 43

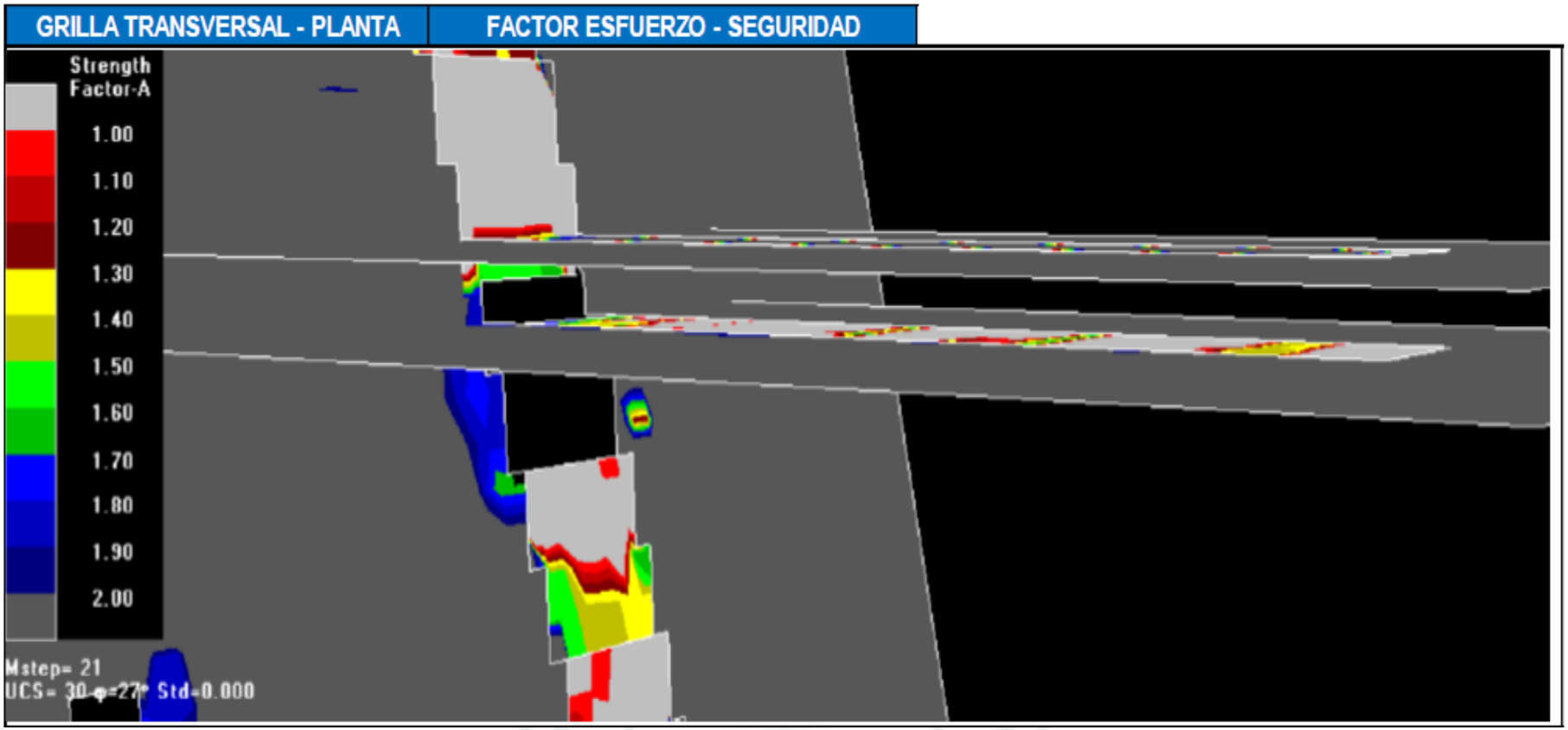
Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzo sigma 1 y sigma 3.

Figura 44

Grilla transversal, planta - Factor de seguridad



Nota. Modelamiento grilla transversal, planta - Factor de seguridad.

Tabla 3

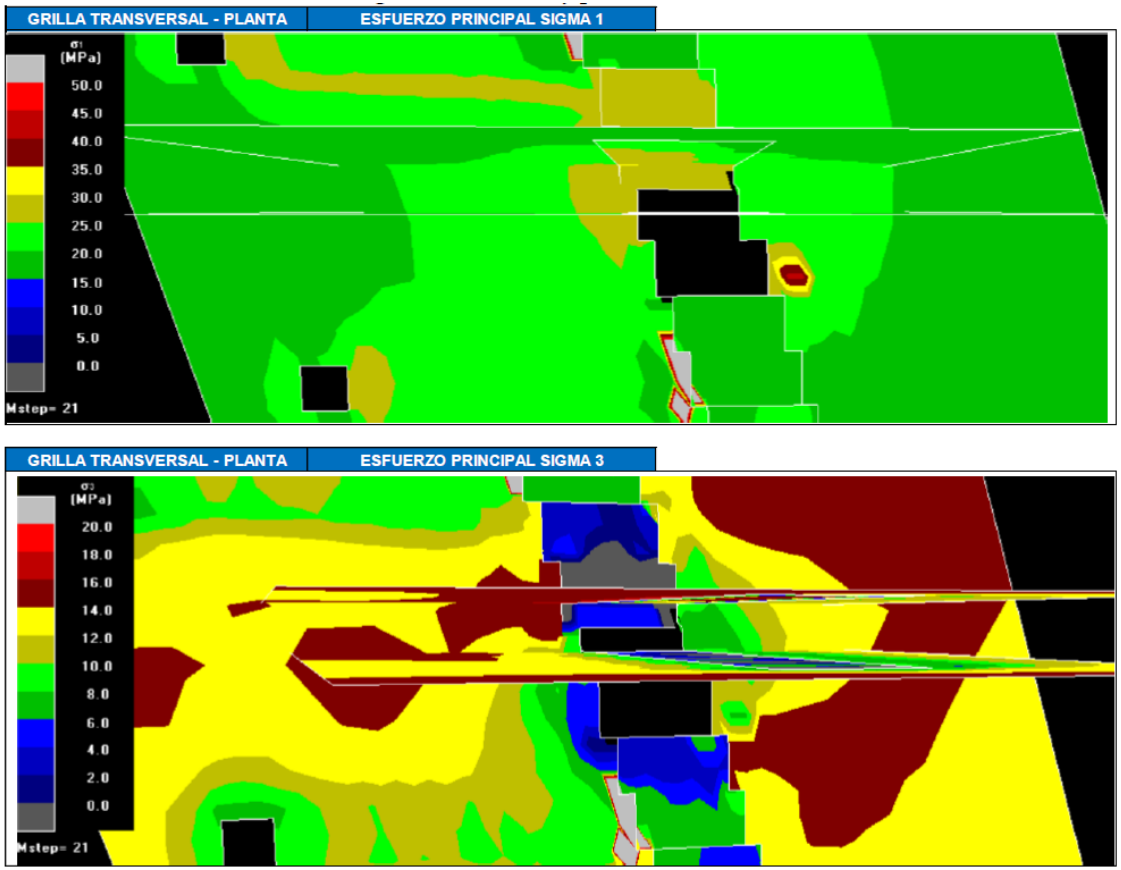
Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Bloque 13	Bloque 14	Bloque 15	Bloque 16	Bloque 17	Bloque 18	Bloque 19	Bloque 20
Ala	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	INTERSEC	INTERSEC
Esfuerzo 1 (mpa)	25	25	35	35	30	30	30	35	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35
Halo influencia	6.62	6.07	5.92	5.48	6.08	6	7.71	5.87	8.48	8.72	9.6	9.13	8.23	7.88	7.91	8.09	7.65	8.14	8.79	6.49
Esfuerzo 3 (mpa)	8	8	4	4	4	6	8	6	6	6	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
Halo influencia	5.18	4.84	4.36	3.95	4.71	5.02	4.78	4.64	7.22	7.39	6.77	6.81	4.02	4.43	4.88	5.46	5.49	5.04	5.16	5.48
Factor de seguridad	1.2	1.2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
Halo influencia losa	2.15	0.72	7.78	7.75	7.18	7.45	7.94	0.96	0.63	0.58	0.49	0.51	0.75	2.7	2.62	2.85	2.53	2.57	2.58	2.41
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4
Halo influencia puente	0.88	0.91	4.24	3.81	2.45	2.74	3.08	3.1	4.39	4.27	1.97	1.96	3.7	2.41	2.82	2.73	2.77	3.36	1.55	2.32

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en la grilla longitudinal con el objetivo de determinar el secuenciamiento óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

Figura 45

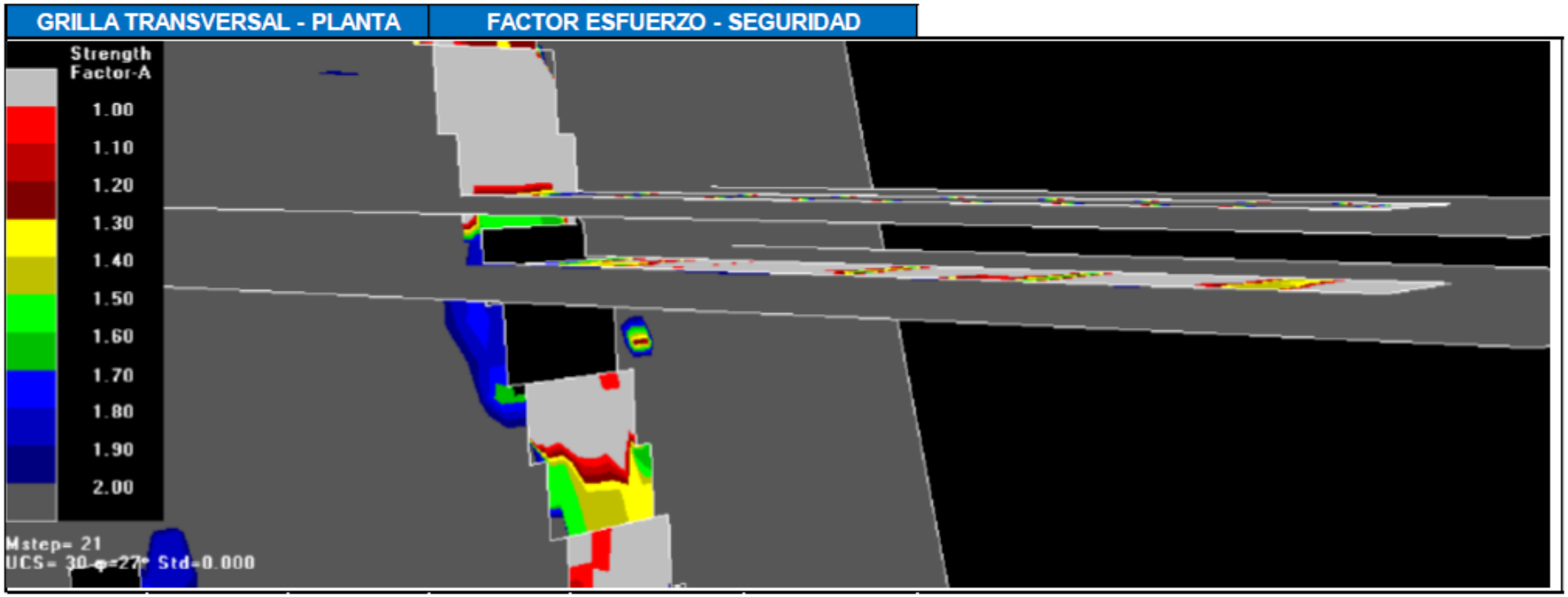
Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzos sigma 1 y sigma 3

Figura 46

Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad



Nota. Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad.

Tabla 4

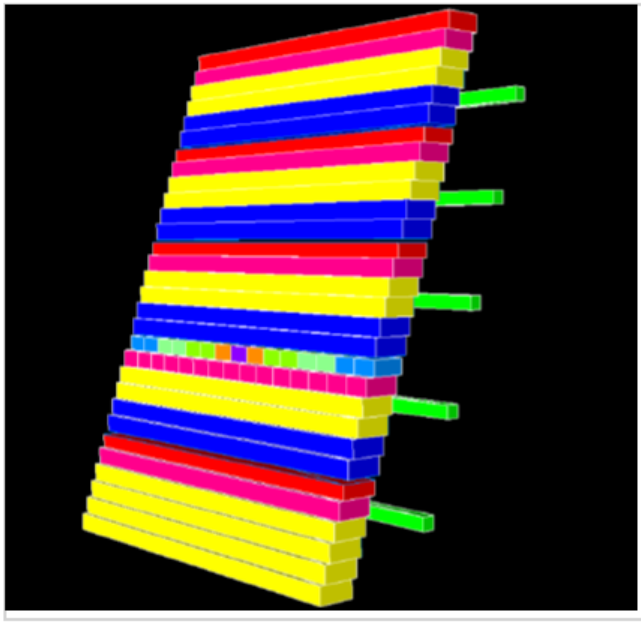
Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Bloque 13	Bloque 14	Bloque 15	Bloque 16	Bloque 17	Bloque 18	Bloque 19	Bloque 20
Ala	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	INTERSEC	INTERSEC
Esfuerzo 1 (mpa)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	30	30	30	30	30	30	30
Halo influencia	8.81	9.28	9.15	8.72	9.2	8.79	9.45	9.23	9.1	9.32	9.26	8.6	9.12	5.58	5.29	5.17	5.73	8.45	10.08	12.53
Esfuerzo 3 (mpa)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Halo influencia	6.59	6.52	7.8	6.57	7.95	7.35	8.23	6.94	7.13	7.55	7.61	7.99	7.5	7.38	8.01	7.86	6.66	6.88	7.37	9.6
Factor de seguridad	1	1	< 1	< 1	< 1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Halo influencia losa	4.33	5.28	3.61	5.84	4.54	0.77	0.47	1.21	1.23	1.17	1.25	1.14	1.16	2.76	3.03	2.63	2.71	2.72	2.77	2.5
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Halo influencia puente	2.64	2.47	2.12	2.2	4.68	3.52	2.51	2.53	3.57	3.53	2.28	2.67	3.37	4.67	3.87	2.67	2.42	2.66	2.65	3.7

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en las grillas transversal y en planta con el objetivo de determinar el secuenciamiento óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

3.10.9 Escenario 02 – SPAN 08 m

Figura 47
Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 02



SUBNIVEL	
ANCHO MINADO (m)	10
ALTURA (m)	5

PUENTE RECUPERACION	
ALTURA (m)	4.5
ANCHO MINADO (m)	9
BLOQUES EVALUADOS	15
RIB PILLAR LONG.CT (m)	1
SILL PILLAR (m)	0.5

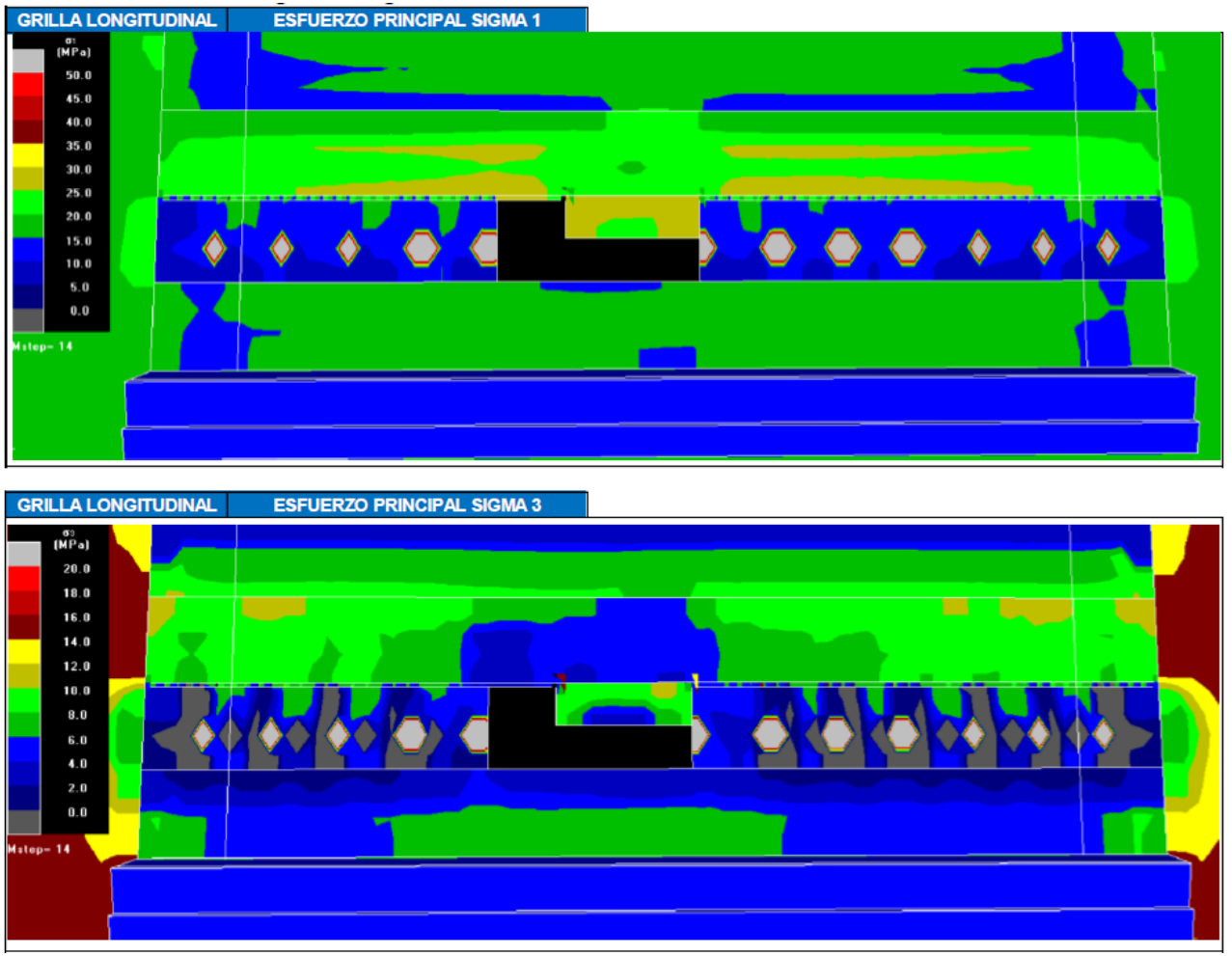
MODELAMIENTO	
STAGES	17
BLOQUES EVALUADOS	15
SPAN (m)	8
SECUENCIA MINADO 1 (ALA N), 2 (ALA S)	

Nota. El segundo escenario contempla paneles de minado de 8 m de SPAN, dentro del modelamiento se consideran 3 parámetros: esfuerzo 1 (esfuerzo principal), esfuerzo 3 (desconfinamiento) y factor de seguridad.

Para este caso se han considerado 17 stages con el objetivo de simular la secuencia de minado en su totalidad y observar el comportamiento tanto del puente como de la losa, se considera relleno en pasta posterior al minado de panel de recuperación.

Figura 48

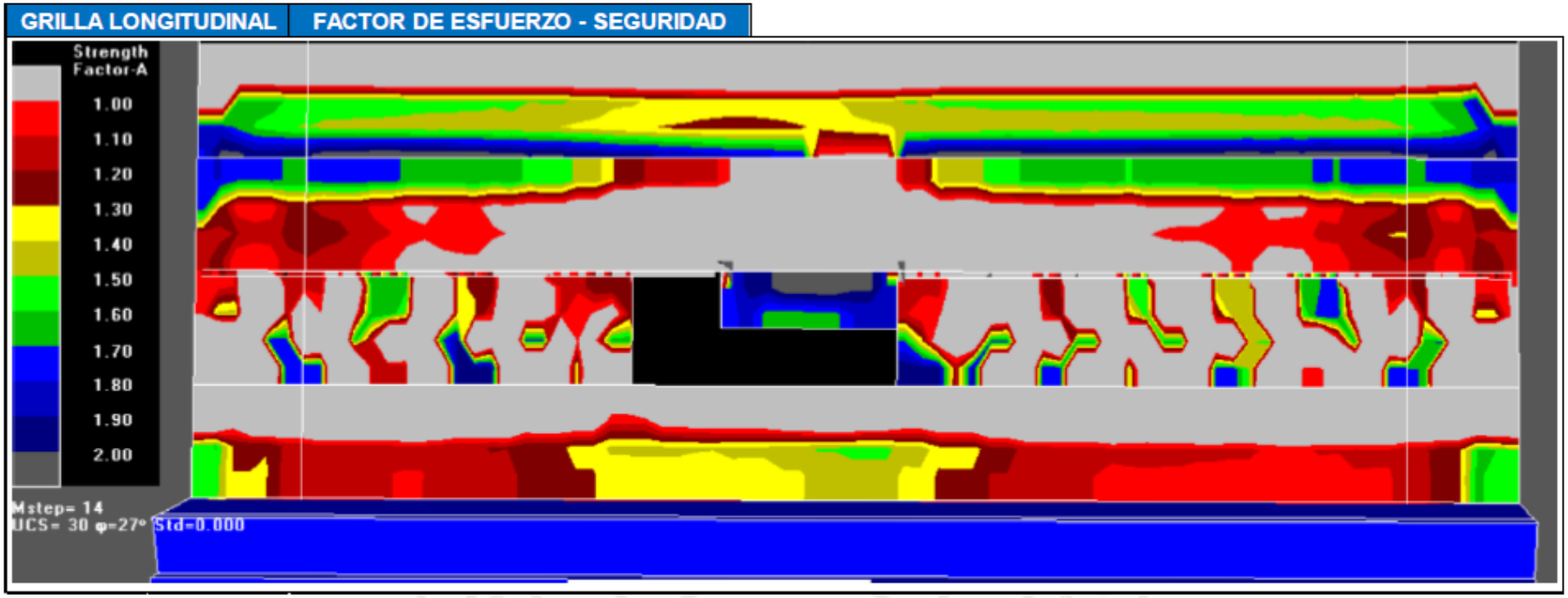
Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzos sigma 1 y sigma 3

Figura 49

Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad



Nota. Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad.

Tabla 5

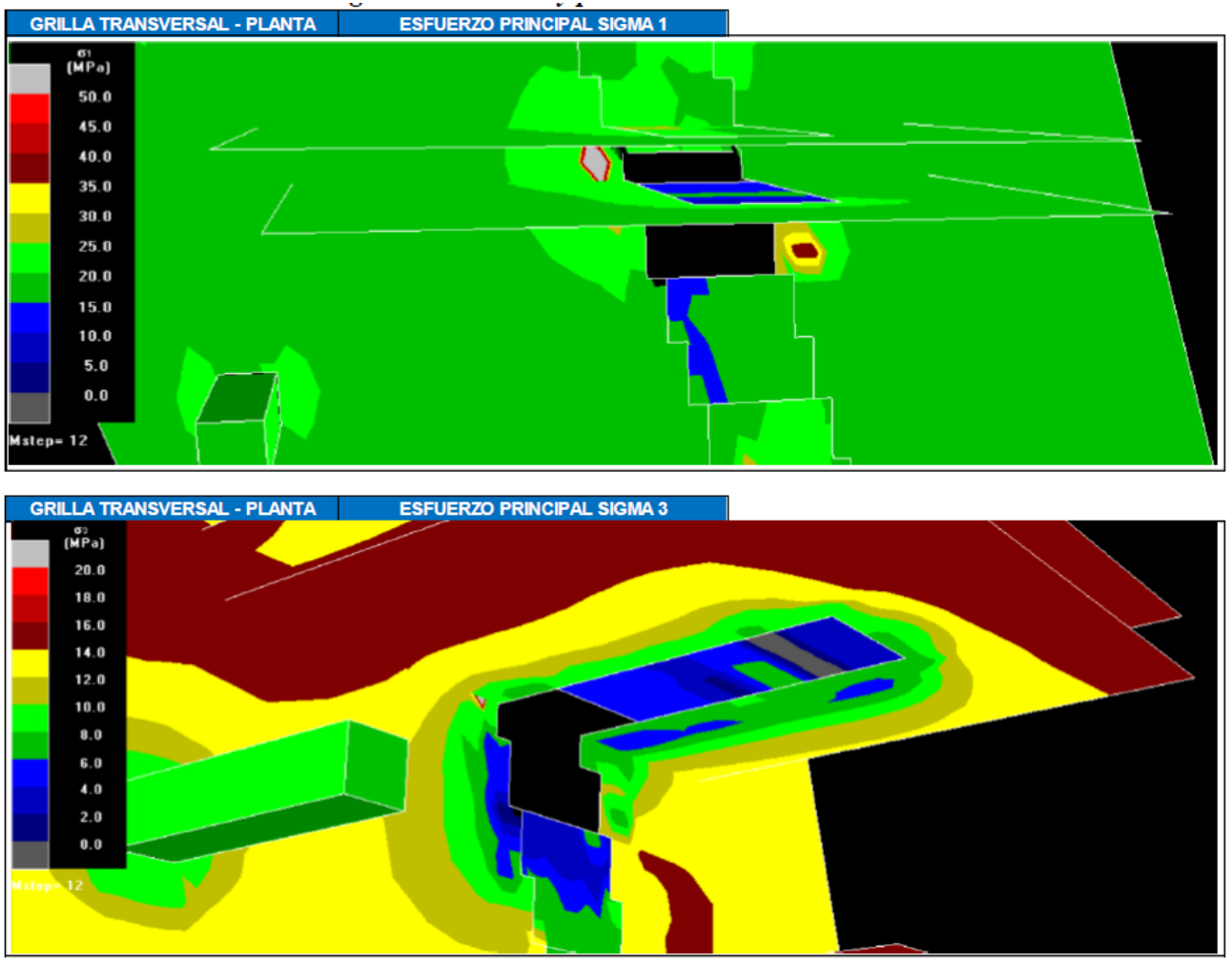
Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Bloque 13	Bloque 14	Bloque 15
Ala	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S	INTERS
Esfuerzo 1 (mpa)	30	32	38	45	30	30	30	30	32	38	45	30	40	35	32
Halo influencia	5.7	8.36	7.43	10.54	8.68	9.48	9.25	5.57	7.21	7.98	9.35	9.78	9.35	8.67	7.78
Esfuerzo 3 (mpa)	6	4	6	6	4	4	4	6	4	6	6	4	4	4	2
Halo influencia	6.37	6.93	7.15	7.26	6.33	6.22	6.25	7.53	6.99	7.35	7.36	6.18	11.94	6.28	8.37
Factor de seguridad	1	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Halo influencia losa	1.44	0.5	0.44	7.7	8.17	7.96	8.35	1.39	0.58	0.54	7.77	8.03	8.21	8.43	11.14
Factor de seguridad	0.99	1.61	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.7	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Halo influencia puente	1.7	1.7	1.96	1.09	1.14	1.07	0.86	2.45	2.48	2.03	1.45	1.3	0.9	0.9	1.25

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en la grilla longitudinal con el objetivo de determinar el secuenciamiento más óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación

Figura 50

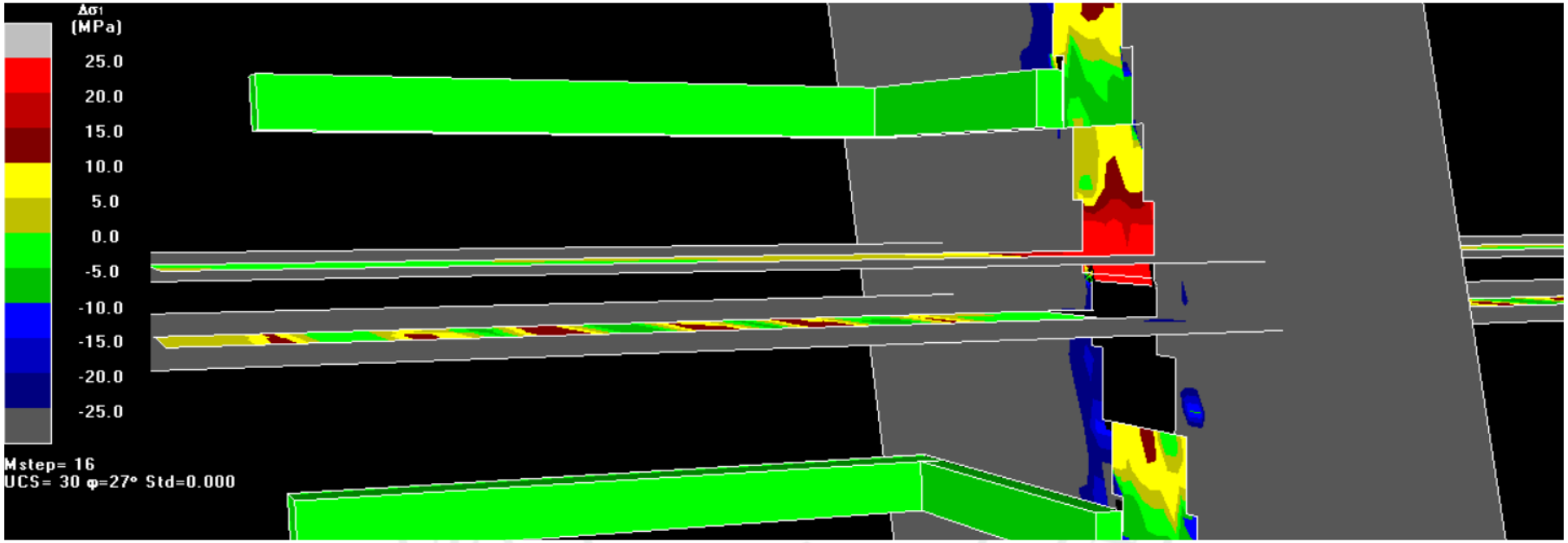
Análisis de σ1 y σ3 en grilla transversal y planta



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzos sigma 1 y sigma 3.

Figura 51

Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad



Nota. Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad.

Tabla 6

Secuencionamiento global SN 9863

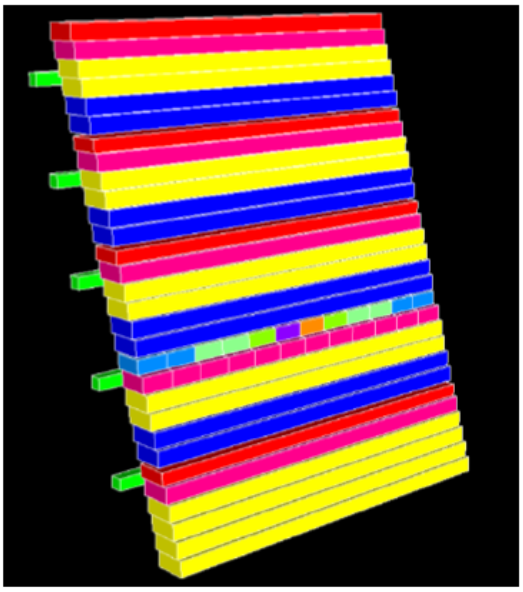
Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12	Bloque 13	Bloque 14	Bloque 15
Ala	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S	INTERS
Esfuerzo 1 (mpa)	25	35	45	45	45	35	45	35	30	45	45	45	45	45	45
Halo influencia	5.18	9.21	8.78	8.65	8.45	5.29	8.28	5.57	5.4	8.47	8.14	8.05	8.24	8.39	8.6
Esfuerzo 3 (mpa)	10	6	6	4	6	6	6	6	6	6	8	8	8	6	6
Halo influencia	4.44	5.17	5.03	4.79	4.12	4.49	3.55	4.04	5.09	3.99	5.89	5.22	6.94	6.87	7.34
Factor de seguridad	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Halo influencia losa	5.13	6.64	5.84	3.42	6.02	5.27	6.26	2.6	3.3	6.63	6.05	6.26	6.05	6.51	7.19
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Halo influencia puente	3.08	3.25	2.74	4.69	2.88	3.03	5.62	3.83	3.27	2.57	4.19	3.25	3.28	3.44	2.74

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en las grillas transversal y en planta con el objetivo de determinar el secuenciamiento más óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

3.10.10 Escenario 03 – SPAN 10 m

Figura 52

Solido 3D, diseño con simulación de veta Ángela escenario 03



SUBNIVEL	
ANCHO MINADO (m)	10
ALTURA (m)	5

PUENTE RECUPERACION	
ALTURA (m)	4.5
ANCHO MINADO (m)	9
BLOQUES EVALUADOS	15
RIB PILLAR LONG.CT (m)	1
SILL PILLAR (m)	0.5

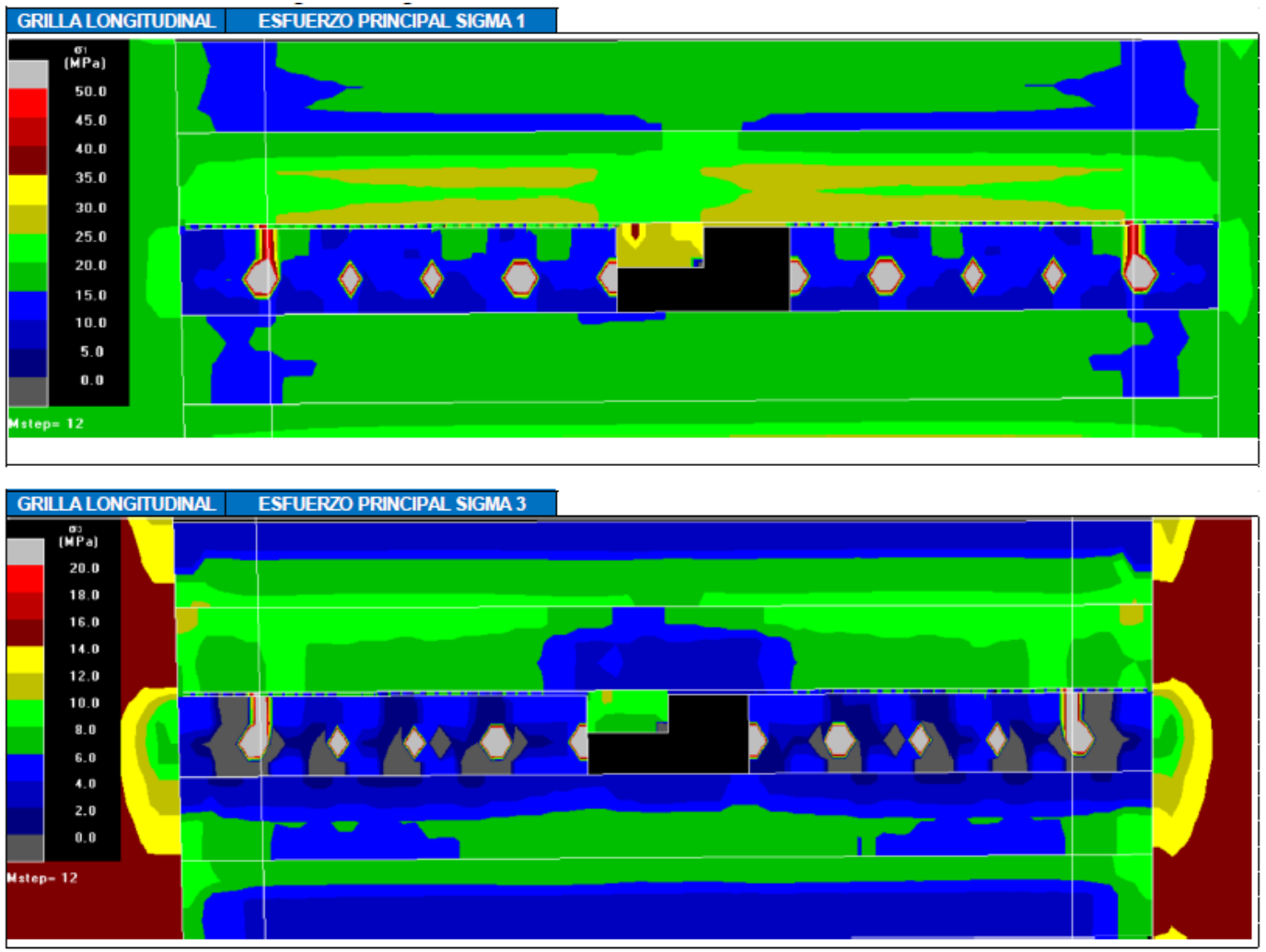
MODELAMIENTO	
STAGES	14
BLOQUES EVALUADOS	12
SPAN (m)	10
SECUENCIA MINADO INTERCALADO N - S	

Nota. El tercer escenario contempla paneles de minado de 10 m de SPAN, dentro del modelamiento se consideran 3 parámetros: esfuerzo 1 (esfuerzo principal), esfuerzo 3 (desconfinamiento) y factor de seguridad.

Para este caso se han considerado 14 stages con el objetivo de simular la secuencia de minado en su totalidad y observar el comportamiento tanto del puente como de la losa, se considera relleno en pasta posterior al minado de panel de recuperación.

Figura 53

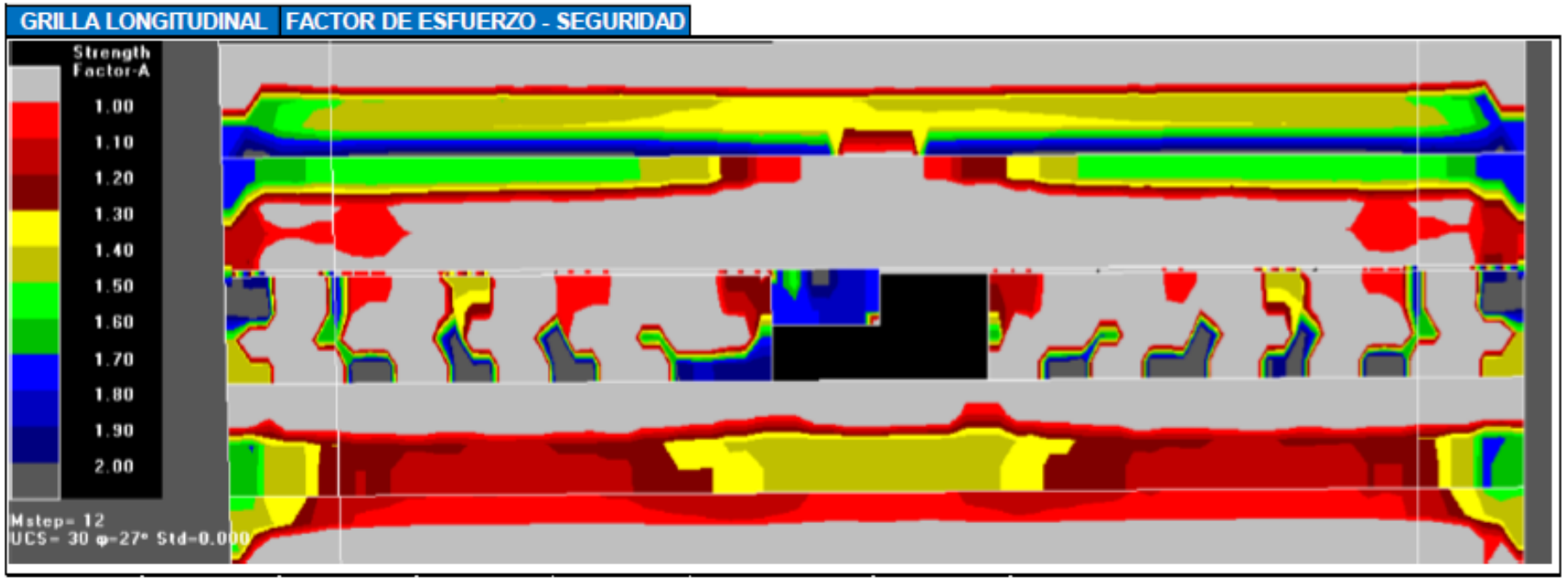
Análisis de modelamiento en grilla longitudinal



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzos sigma 1 y sigma 3.

Figura 54

Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad



Nota. Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad.

Tabla 7

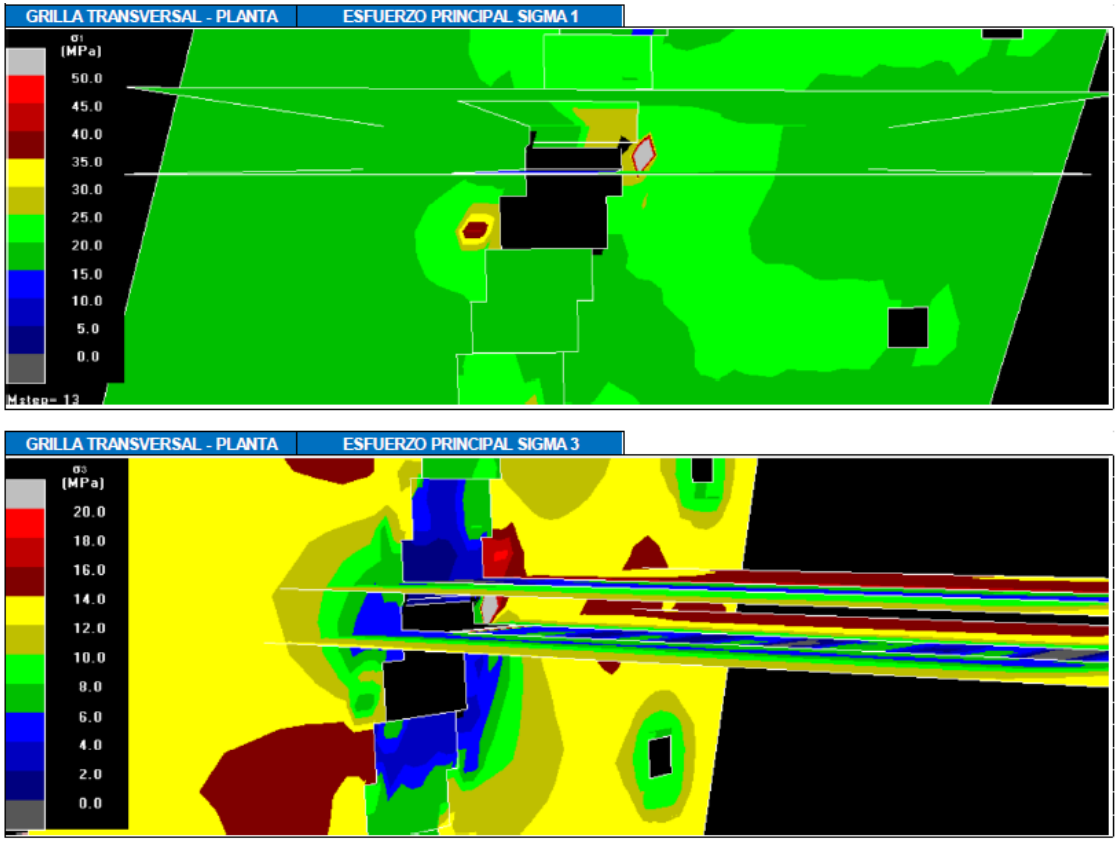
Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12
Ala	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	INTERSEC	INTERSEC
Esfuerzo 1 (mpa)	30	30	35	30	30	30	30	30	35	35	35	30
Halo influencia	7.06	7.02	8.32	8.14	9.16	9.02	9.53	9.32	11.14	8.53	10.35	7.44
Esfuerzo 3 (mpa)	6	8	4	4	6	6	4	4	4	4	4	2
Halo influencia	3.61	5.57	6.89	7.05	7.38	7.45	7.12	7.23	7.06	6.76	6.46	6.76
Factor de seguridad	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Halo influencia losa	2.53	1.39	8.16	8.17	7.85	7.95	7.83	8.02	8.31	8.33	11.19	11.26
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1
Halo influencia puente	1.52	0.85	3.84	3.55	5.16	5.95	2.63	2.74	3.86	3.86	6.25	2.54

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en la grilla longitudinal con el objetivo de determinar el secuenciamiento óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

Figura 55

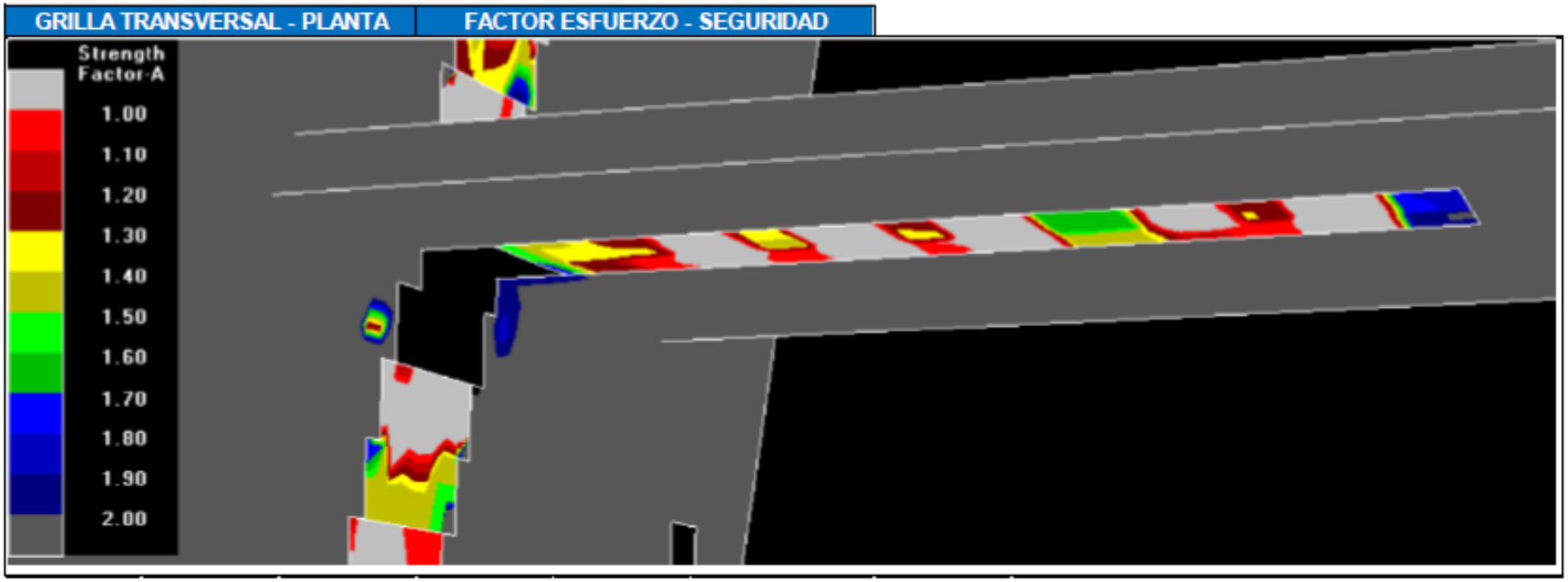
Interpretación de modelamiento en grilla transversal y planta



Nota. Modelamiento en grilla transversal y planta esfuerzos sigma 1 y sigma 3.

Figura 56

Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad



Nota. Modelamiento en grilla transversal, factor de seguridad.

Tabla 8

Secuencionamiento global SN 9863

Parámetro	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5	Bloque 6	Bloque 7	Bloque 8	Bloque 9	Bloque 10	Bloque 11	Bloque 12
Ala	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	INTERSEC	INTERSEC
Esfuerzo 1 (mpa)	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Halo influencia	8.93	9.33	9.19	8.99	9.4	8.53	9.48	9.01	9.14	9.22	9.23	9.11
Esfuerzo 3 (mpa)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Halo influencia	7.22	7.94	10.43	8.74	10.08	9.18	9.01	8.31	8.46	7.93	7.12	6.9
Factor de seguridad	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Halo influencia losa	4.03	5.5	6.04	6.31	6.33	6.24	6.27	6.16	6.53	6.34	6.85	6.93
Factor de seguridad	1.7	1.7	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Halo influencia puente	1.81	1.82	4.16	2.2	4.08	4.31	3.06	3.28	4.5	3.27	1.51	2.66

Nota. Se determina por stage (ciclo de minado) los valores más críticos y sus respectivos halos de influencia en las grillas transversal y en planta con el objetivo de determinar el secuenciamiento óptimo, así como la estabilidad global del SN 9863 para el proceso de recuperación.

3.10.11 Resumen interpretación de escenario 01

De acuerdo al modelamiento desarrollado y considerando los resultados obtenidos en la proyección de las 3 grillas, longitudinal, transversal y planta, se determina el siguiente resumen en base a los datos previamente expuestos:

Tabla 9
Resumen interpretación de escenario 01

ESCENARIO 01 GRILLA LONGITUDINAL	MÁXIMO	MÍNIMO	PROMEDIO	DES. ESTÁNDAR
ESFUERZO 1 (MPa)	35	25	30.5	2.76
HALO INFLUENCIA	9.6	5.48	7.44	1.26
ESFUERZO 3 (MPa)	8	0	3.6	3.02
HALO INFLUENCIA	7.39	3.95	5.28	1.01
FACTOR DE SEGURIDAD	75%	25%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	7.94	0.49	3.16	2.78
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1.4	1.67	0.09
HALO INFLUENCIA PUENTE	4.39	0.88	2.77	1.02
ESCENARIO 01 GRILLA TRANSVERSAL - PLANTA	**MÁXIMO**	**MÍNIMO**	**PROMEDIO**	**DES. ESTÁNDAR**
ESFUERZO 1 (MPa)	35	30	33.25	2.45
HALO INFLUENCIA	12.53	5.17	8.54	1.80
ESFUERZO 3 (MPa)	8	8	8	0.00
HALO INFLUENCIA	9.6	6.52	7.57	0.79
FACTOR DE SEGURIDAD	85%	15%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	5.84	0.47	2.56	1.55
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1.7	1.70	0.00
HALO INFLUENCIA PUENTE	4.68	2.12	3.04	0.78

Nota. Resumen interpretación de escenario 01, grilla longitudinal y grilla transversal de planta.

- **Esfuerzo 1:** De 25 a 35 Mpa, es un rango intermedio, presentándose con mayor criticidad a medida que la secuencia de minado se acerca a intersección, con un halo de influencia promedio de 8 m.

- **Esfuerzo 3:** De 0 a 8 Mpa, es un rango intermedio - alto, con un halo de influencia promedio de 8.4 m, debiéndose controlar y monitorear durante el minado el comportamiento de cohesión del relleno cementado frente al desconfinamiento.

- **Factor de seguridad losa:** El valor máximo implica que entre el 75 y 85% del área de losa presenta una condición estable y entre el 15 y 25% una condición inestable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de deformación promedio de 3.30 m.

- **Factor de seguridad puente:** Los valores obtenidos son de 1.4 a 1.7, siendo un resultado favorable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de influencia promedio de 3 m.

3.10.12Resumen interpretación de escenario 02

Tabla 10
Resumen interpretación de escenario 02

ESCENARIO 02 GRILLA LONGITUDINAL	**MÁXIMO**	**MÍNIMO**	**PROMEDIO**	**DES. ESTÁNDAR**
ESFUERZO 1 (MPa)	45	30	34.47	5.45
HALO INFLUENCIA	10.54	5.57	8.34	1.43
ESFUERZO 3 (MPa)	6	2	4.67	1.23
HALO INFLUENCIA	11.94	6.18	7.23	1.45
FACTOR DE SEGURIDAD	40%	60%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	11.14	0.44	5.38	3.95
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1	1.20	0.22
HALO INFLUENCIA PUENTE	2.48	0.86	1.49	0.54
ESCENARIO 02 GRILLA TRANSVERSAL - PLANTA	**MÁXIMO**	**MÍNIMO**	**PROMEDIO**	**DES. ESTÁNDAR**
ESFUERZO 1 (MPa)	45	25	40.67	6.78
HALO INFLUENCIA	9.21	5.18	7.65	1.46
ESFUERZO 3 (MPa)	10	4	6.53	1.41
HALO INFLUENCIA	7.34	3.55	5.13	1.16
FACTOR DE SEGURIDAD	13%	87%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	7.19	2.6	5.54	1.37
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1.7	1.70	0.00
HALO INFLUENCIA PUENTE	5.62	2.57	3.46	0.82

Nota. Resumen interpretación de escenario 02, grilla longitudinal y grilla transversal de planta.

- **Esfuerzo 1:** De 25 a 45 Mpa, es un rango intermedio - alto, presentándose con mayor criticidad a medida que la secuencia de minado se acerca a intersección, con un halo de influencia promedio de 8 m.

- **Esfuerzo 3;** De 2 a 10 Mpa, es un rango intermedio, con un halo de influencia promedio de 6.5 m, debiéndose controlar y monitorear durante el minado el comportamiento de cohesión del relleno cementado frente al desconfinamiento.
- **Factor de seguridad losa:** El valor máximo implica que entre el 13 y 40% del área de losa presenta una condición estable y entre el 60 y 87% una condición inestable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de deformación promedio de 5.5 m.
- **Factor de seguridad puente:** Los valores obtenidos son de 1.4 a 1.7, siendo un resultado favorable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de influencia promedio de 2.5 m.

3.10.13 Resumen interpretación de escenario 03

Tabla 11
Resumen interpretación de escenario 03

ESCENARIO 03 GRILLA LONGITUDINAL	**MÁXIMO**	**MÍNIMO**	**PROMEDIO**	**DES. ESTÁNDAR**
ESFUERZO 1 (MPa)	35	30	31.67	2.46
HALO INFLUENCIA	11.14	7.02	8.75	1.27
ESFUERZO 3 (MPa)	8	2	4.67	1.56
HALO INFLUENCIA	7.45	3.61	6.61	1.07
FACTOR DE SEGURIDAD	17%	83%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	11.26	1.39	7.58	2.90
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1.1	1.65	0.17
HALO INFLUENCIA PUENTE	6.25	0.85	3.56	1.65
ESCENARIO 03 GRILLA TRANSVERSAL - PLANTA	**MÁXIMO**	**MÍNIMO**	**PROMEDIO**	**DES. ESTÁNDAR**
ESFUERZO 1 (MPa)	40	35	35.42	1.44
HALO INFLUENCIA	9.48	8.53	9.13	0.25

ESFUERZO 3 (MPa)	8	8	8.00	0.00
HALO INFLUENCIA	10.43	6.9	8.44	1.12
FACTOR DE SEGURIDAD	8%	92%	-	-
HALO INFLUENCIA LOSA	6.93	4.03	6.13	0.76
FACTOR DE SEGURIDAD	1.7	1.5	1.68	0.06
HALO INFLUENCIA PUENTE	4.5	1.51	3.06	1.06

Nota. Resumen interpretación de escenario 03, grilla longitudinal y grilla transversal de planta.

- **Esfuerzo 1:** De 30 a 40 Mpa, es un rango intermedio – alto, presentándose con mayor criticidad a medida que la secuencia de minado se acerca a intersección, con un halo de influencia promedio de 8.9 m.
- **Esfuerzo 3:** De 2 a 8 Mpa, es un rango intermedio, con un halo de influencia promedio de 7.5 m, debiéndose controlar y monitorear durante el minado el comportamiento de cohesión del relleno cementado frente al desconfinamiento.
- **Factor de seguridad losa:** El valor máximo implica que entre el 8 y 17% del área de losa presenta una condición estable y entre el 83 y 92% una condición inestable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de deformación promedio de 6.7 m.
- **Factor de seguridad puente:** Los valores obtenidos son de 1.1 a 1.7, siendo un resultado favorable, en ambos casos posterior al minado de panel de recuperación, con un halo de influencia promedio de 3.3 m.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

- Con respecto a las secciones geológicas se observa que la caja techo presenta zonas de falla con potencias mayores a 1.5 m; y con respecto a las secciones topográficas se observa que la veta presenta un comportamiento sinuoso y de inflexión, ambos casos actúan como factores influyentes en la zona a recuperar
- La veta Ángela NE presenta una irregularidad con respecto al drenaje de agua, habiéndose presentado como flujo en el nivel de acceso a la veta, en la zona in situ con mayor proximidad al NE y la zona de profundización, relacionado principalmente a las condiciones estructurales.
- Con respecto a la estadística de eventos de inestabilidad, el mayor porcentaje está relacionado al relajamiento de macizo rocoso (placas de pernos hundidas, malla sobrecargada) y fisuramiento de concreto prematuro, presentándose inclusive a pocos días.
- La veta Ángela NE presenta una condición estructural compleja, en la zona de mineralización la tendencia de orientación es paralela al avance y en la zona de desarrollo y preparación se observa una tendencia de orientación perpendicular al avance; el rango promedio de buzamiento se presenta entre 60° y 70°, con un azimut entre 300° y 310°, paralelo a la estructura mineralizada
- El valor de convergencia más cercano a la zona de recuperación es de -15 mm, siendo un rango medio, a medida que se avanza hacia el ala N el valor incrementa significativamente; el valor de velocidad más cercano a la zona de recuperación es de 1 mm/ día, siendo un rango medio, a medida que se avanza hacia el ala N se alcanza 6 mm/ día, siendo una condición de riesgo.

- Con respecto a la zonificación geomecánica:

  En la zona de recuperación en la caja techo, en el SN 9863 (bloque inferior) tanto en los extremos N y S la roca predominante es IVB (RMR: 25), en el SN 9864 (bloque superior) la roca presenta una calidad entre IVA y IVB.

  En la zona de recuperación en la caja piso, en el SN 9863 (bloque inferior) tanto en los extremos N y S la roca predominante es IVA (RMR: 35), en el SN 9864 (bloque superior) la roca presenta una calidad predominante IVA.

- Con respecto al resultado de los 3 escenarios, se resume con respecto al comportamiento de la losa y su halo de perturbación:

  Escenario 01 – SPAN 6 m: El valor máximo implica que entre el 75 y 85% del área de losa presenta una condición estable y entre el 15 y 25% una condición inestable, con un halo de deformación promedio de 3.30 m; este escenario presenta un rango bajo de probabilidad de falla.

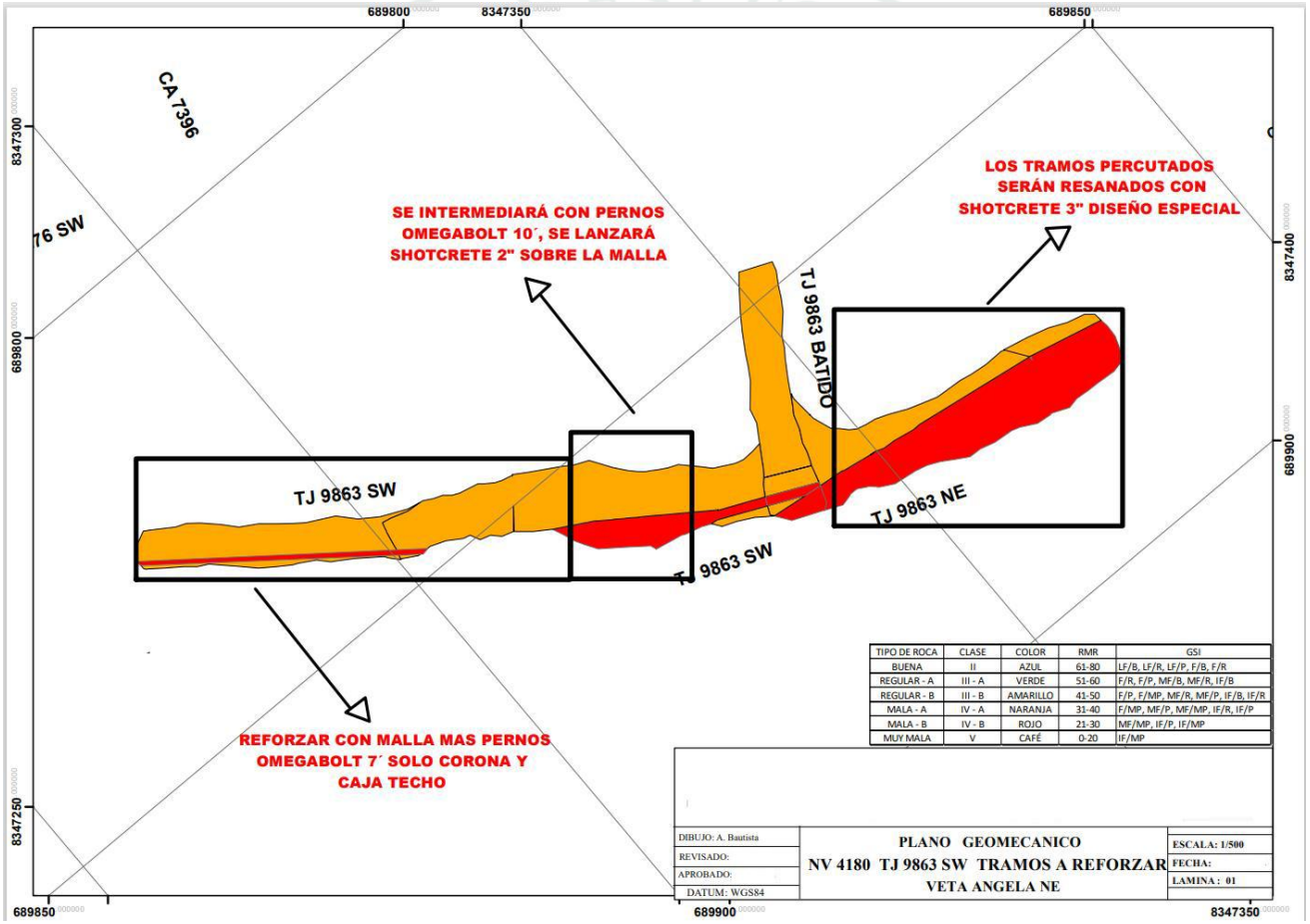
  Escenario 02 – SPAN 8 m: El valor máximo implica que entre el 13 y 40% del área de losa presenta una condición estable y entre el 60 y 87% una condición inestable, con un halo de deformación promedio de 5.5 m, este escenario presenta un rango medio de probabilidad de falla.

  Escenario 03 – SPAN 10: El valor máximo implica que entre el 8 y 17% del área de losa presenta una condición estable y entre el 83 y 92% una condición inestable, con un halo de deformación promedio de 6.7 m, este escenario presenta un rango alto de probabilidad de falla.

RECOMENDACIONES

Figura 57

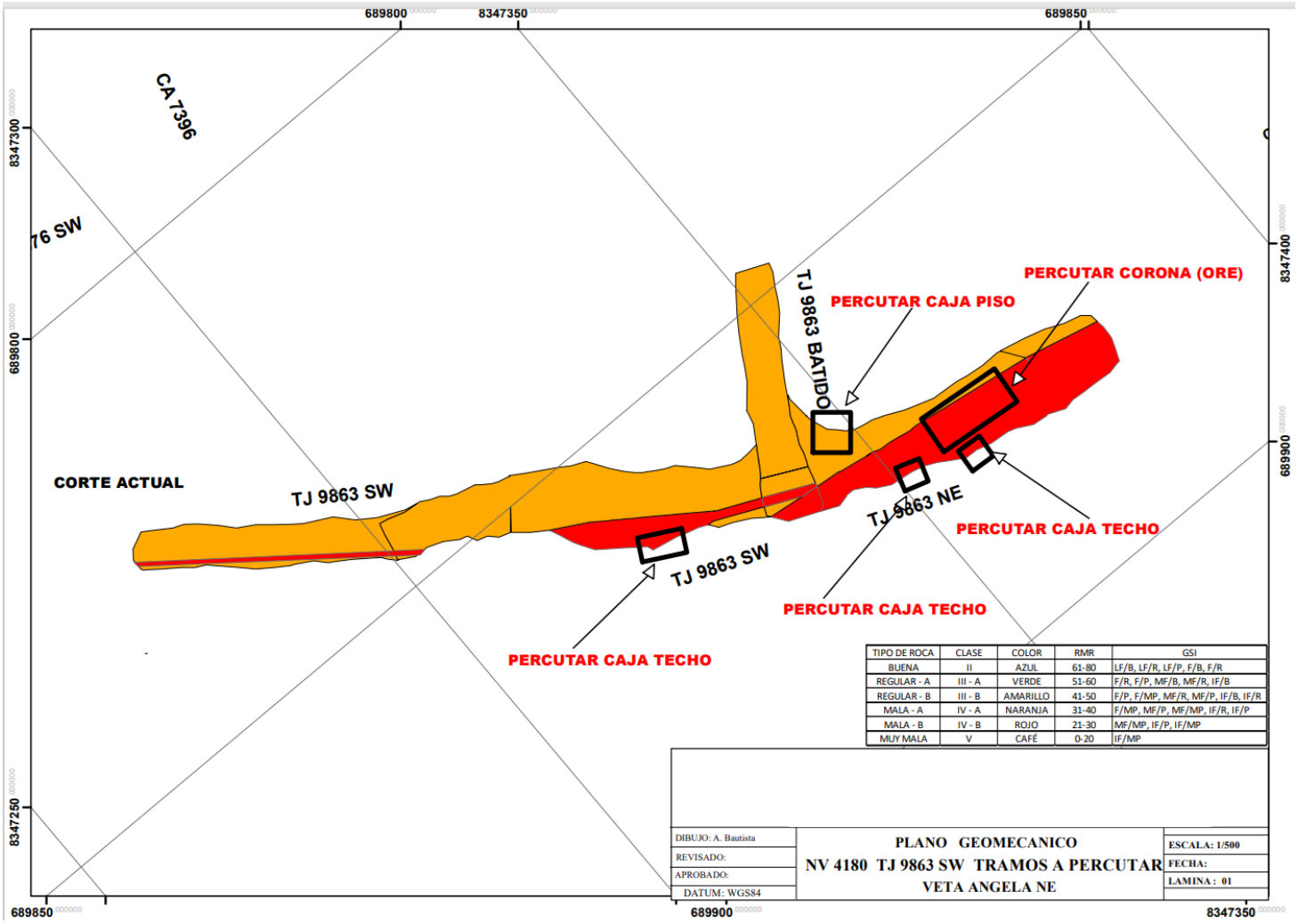
NV 4180 TJ 9863 SW Tramos a reforzar veta Angela NE



Nota. Rehabilitación y refuerzo previo a minado.

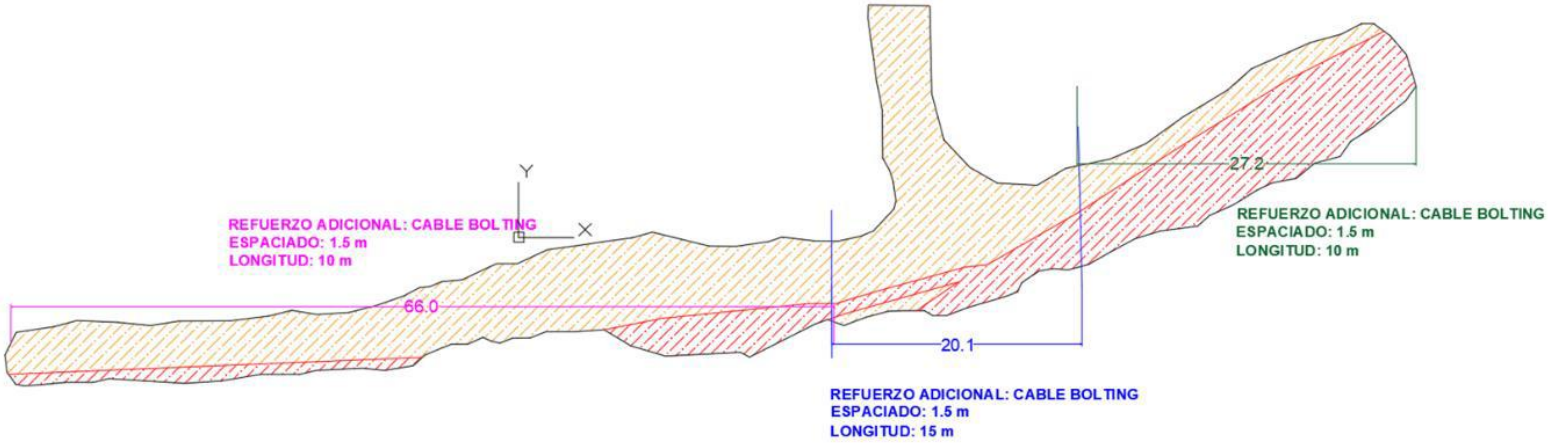
Figura 58

NV 4180 TJ 9863 SW Tramos a percutar veta Angela NE



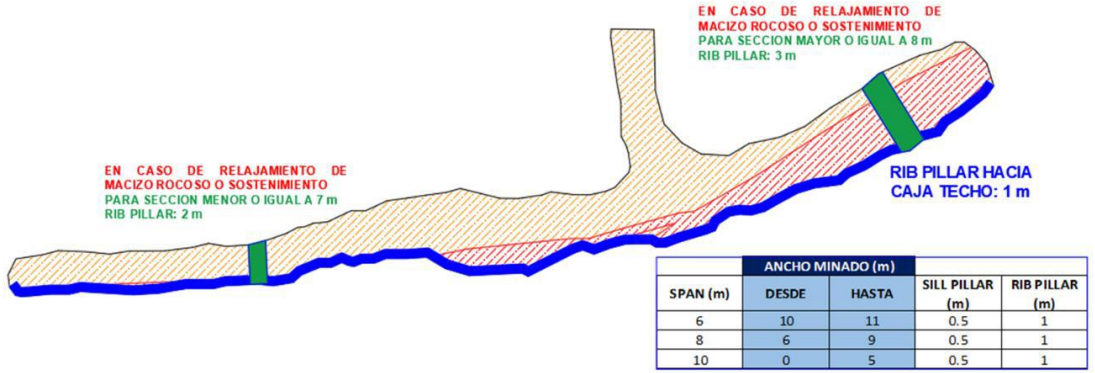
Nota. Rehabilitación y refuerzo previo a minado.

Figura 59
Instalación de cable bolting



Nota. Refuerzos con cable bolting.

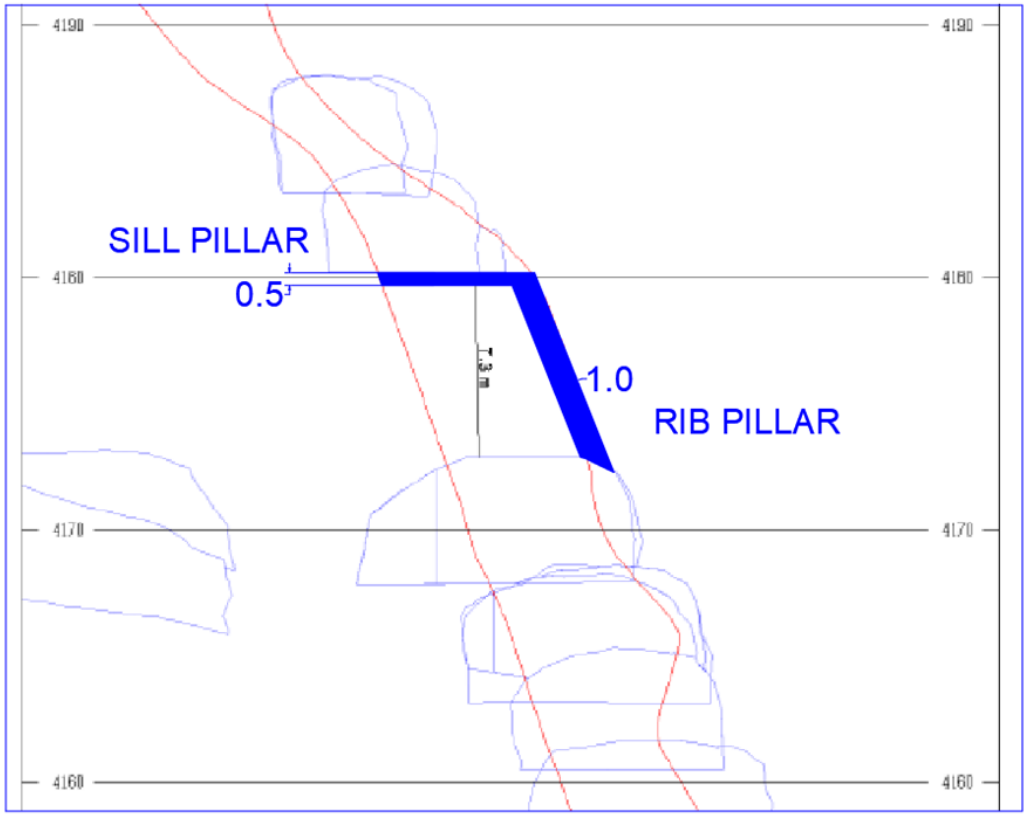
Figura 60
SPAN y RIB PILLAR



SPAN (m)	ANCHO MINADO (m) DESDE	HASTA	SILL PILLAR (m)	RIB PILLAR (m)
6	10	11	0.5	1
8	6	9	0.5	1
10	0	5	0.5	1

Nota. Relajamiento de macizo rocoso o sostenimiento.

Figura 61
SILL y RIB PILLAR



Nota. Tanto el sill pillar como el rib pillar se mantendrán a lo largo de todo el minado, 0.5 m de sill pillar como escudo para atenuar daño por voladura, 1 m de rib pillar hacia la caja techo debido a las zonas de falla con potencia mínimas a 1.5 m

- Ante cualquier variación en campo de los parámetros previamente indicados se deberá paralizar la actividad para realizar una inspección y evaluación tanto empírica como numérica.
- Posterior a cada minado de panel de acuerdo al SPAN se debe rellenar con relleno en pasta, se debe considerar un relleno ciego dado que esto permitirá una mejor redistribución de esfuerzos a medida que nos aproximemos a la intersección (zona más crítica), caso contrario se deberá considerar dejar rib pillar en las zonas aledañas de la intersección (radios de curvatura).
- El TAS del panel minado es INMEDIATO, es decir debemos proceder a rellenar antes de las 12 horas para evitar mayor perturbación en la zona aledaña.

REFERENCIAS

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). Rock mechanics for underground mining (3.ª ed.). Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-2116-9

Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., Ellenberger, J. L., & Prosser, L. J., Jr. (2011). Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines (Information Circular 9526; DHHS [NIOSH] Publication No. 2011-171). National Institute for Occupational Safety and Health. Documento institucional

Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI—2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 445–463. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518303846?via%3Dihub

Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(2), 203–215. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160905000948?via%3Dihub

Martin, C. D., & Maybee, W. G. (2000). The strength of hard-rock pillars. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(8), 1239–1246. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160900000320?via%3Dihub

Milne, D., Hadjigeorgiou, J., & Pakalnis, R. (1998). Rock mass characterization for underground hard rock mines. Tunnelling and Underground Space Technology, 13(4), 383–391.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779898000819?via%3Dihub

Rafiei Renani, H., & Martin, C. D. (2018). Modeling the progressive failure of hard rock pillars. Tunnelling and Underground Space Technology, 74, 71–81. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779817306119?via%3Dihub

Rocscience. (s. f.). Documentation and theory overview. EX3. Documentación técnica

Yilmaz, E., & Fall, M. (Eds.). (2017). Paste tailings management. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-39682-8