

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**TESIS PROFESIONAL**

**EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL  
TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES – CACHACHI -  
CAJABAMBA**

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

Autor:

**Bach. Idrogo Bustamante Jhonatan Henry**

Asesor:

**M.Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino**

**Cajamarca - Perú**

**2025**

## **CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

### **- FACULTAD DE INGENIERÍA -**

**1. Investigador:** JHONATAN HENRY IDROGO BUSTAMANTE

DNI: 78376038

**Escuela Profesional:** ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

**2. Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino

**Facultad:** Ingeniería

**3. Grado académico o título profesional**

- Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor

**4. Tipo de Investigación:**

- Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico

**5. Título de Trabajo de Investigación:**

EVALUACIÓN GEOMEcÁNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES – CACHACHI - CAJABAMBA

**Fecha de evaluación:** 28/10/2025

**6. Software antiplagio:**  TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)

**7. Porcentaje de Informe de Similitud:** 8%

**8. Código Documento:** Oide:3117:519577237

**9. Resultado de la Evaluación de Similitud:**

APROBADO  PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 28/10/2025



---

**FIRMA DEL ASESOR**  
*Roberto Severino Gonzales Yana*

---

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI**

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



# Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



### ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

**TITULO** : EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES - CACHACHI - CAJABAMBA

**ASESOR** : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0767-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 23 de diciembre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta días del mes de diciembre de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J – 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Secretario : M.Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES - CACHACHI - CAJABAMBA**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas JHONATAN HENRY IDROGO BUSTAMANTE, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ..... 04 ..... PTS.  
EVALUACIÓN PÚBLICA : ..... 10 ..... PTS.  
EVALUACIÓN FINAL : ..... 14 ..... PTS ..... CATO20E ..... (En letras)

En consecuencia, se lo declara 100% NO con el calificativo de CATO20E.  
acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10:00 hrs horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

M.Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca  
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Asesor



# Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



### **EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.**

Bachiller en Ingeniería de Minas: JHONATAN HENRY IDROGO BUSTAMANTE.

RUBRO	PUNTAJE Máximo/Calificación
<b>2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA</b>	
2.1. Capacidad de síntesis	3
2.2. Dominio del tema	3
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	2
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2
<b>PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)</b>	<b>10</b>

Cajamarca, 30 de diciembre de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca  
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Asesor



# Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



### EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería de Minas: JHONATAN HENRY IDROGO BUSTAMANTE.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	04
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	10
<b>EVALUACIÓN FINAL</b>	
EN NÚMEROS ( A + B )	14
EN LETRAS ( A + B )	CATORCE
- Excelente 20 - 19	Bueno
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 30 de diciembre de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Presidente

M.Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca  
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al Dios todo poderoso por siempre estar a mi lado: Protegiéndome y guiándome, a sobre salir de este mundo lleno de retos y anhelos. Así mismo a la Universidad Nacional de Cajamarca y Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, acogernos en sus aulas universitarias llenas de sabiduría, y también a los docentes universitarios encargados de compartir su conocimiento profesional en el mundo de la minería y obras públicas.

También dirijo estas emotivas palabras a mi asesor de tesis el M.Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino, por: La aceptación, guía y acompañamiento; desde la elaboración hasta sustentar final de la tesis.

J.H.I.B.

## **DEDICATORIA**

Está dirigida principalmente a mí: madre Asunción Elita y a mi padre Luis Alberto, por siempre estar a mi lado en cada momento de mi vida; siendo los pilares principales de mi formación como persona. Así mismo también deseo nombrar a mis hermanos por estar siempre juntos y unidos, logrando cada uno de nosotros, metas y logros para llegar a ser excelente personas y profesionales para nuestras familias y sociedad en general.

J.H.I.B.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	ii
<b>DEDICATORIA .....</b>	iii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	vii
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	ix
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	x
<b>RESUMEN .....</b>	xiv
<b>ABSTRACT.....</b>	xv

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

<b>2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS.....</b>	3
2.1.1 Internacionales .....	3
2.1.2 Nacionales.....	4
2.1.3 Locales .....	5
<b>2.2 BASES TEÓRICAS.....</b>	7
2.2.1 Caracterización Geomecánica .....	7
2.2.2 Estimación de Esfuerzos Insitu .....	14
2.2.3 Criterio de Rotura de Hoek - Brown .....	14
2.2.4 Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown .....	17
2.2.5 Método de los Elementos Finitos .....	20
2.2.6 Software Phase2 .....	21
2.2.7 Sostenimiento en Túneles .....	22
<b>2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....</b>	24

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

	Pág.
<b>3.1 UBICACIÓN .....</b>	26
<b>3.2 ACCESIBILIDAD .....</b>	27
<b>3.3 CLIMA Y METEOROLOGÍA .....</b>	29
<b>3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	30
3.4.1 Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación.....	31
3.4.2 Población.....	32
3.4.3 Muestra .....	32
3.4.4 Unidad de Análisis.....	32
3.4.5 Tipo e Instrumentos de Información .....	32
3.4.6 Equipos, Materiales y Soporte Computacional.....	34

## CAPÍTULO IV

### PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

<b>4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	35
4.1.1 Geología Local .....	35
4.1.2 Hidrología .....	37
4.1.3 Hidrogeología Local.....	40
4.1.4 Geología Estructural.....	41
4.1.5 Sismicidad .....	43
4.1.6 Geomecánica .....	44
4.1.7 Sostenimiento.....	60
<b>4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	61
<b>4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....</b>	62

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

<b>5.1 CONCLUSIONES.....</b>	63
<b>5.2 RECOMENDACIONES .....</b>	64

	Pág.
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO A: AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO B: REGISTRO GEOMECÁNICO .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO C: PLANOS .....</b>	<b>79</b>
<b>PLANO 01: IMAGEN SATELITAL.....</b>	<b>80</b>
<b>PLANO 02: UBICACIÓN .....</b>	<b>81</b>
<b>PLANO 03: GEOLÓGICO.....</b>	<b>82</b>
<b>PLANO 04: GEOMECÁNICO .....</b>	<b>83</b>
<b>PLANO 05: TENSODEFORMACIONAL.....</b>	<b>84</b>
<b>PLANO 06: ZONIFICACIÓN CRÍTICA .....</b>	<b>85</b>
<b>PLANO 07: SOSTENIMIENTO .....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

D	:	Factor de Perturbación.
EG	:	Estación Geomecánica.
E <sub>i</sub>	:	Módulo de Deformación para Roca Intacta.
E <sub>h</sub>	:	Módulo de Deformación de la Roca en Dirección Horizontal.
E <sub>m</sub>	:	Módulo de Deformación del Macizo Rocoso.
ESR	:	Relación de Soporte de la Excavación.
FS	:	Factor de Seguridad.
GPa.	:	Gigapascales.
GPS	:	Sistema de Posicionamiento Global.
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica.
H	:	Profundidad del Túnel con Respecto a la Superficie.
HNS	:	Hildebrand, Nahum y Salomon.
Ja	:	Índice de Alteración de las Discontinuidades.
Jn	:	Índice de Diaclasado.
Jr	:	Índice de Rugosidad de las Discontinuidades.
Jw	:	Factor de Reducción por la Presencia de Agua.
K	:	Coeficiente de Reparto de Tensiones.
m <sub>b</sub>	:	Constante para Macizos Rocosos.
m <sub>i</sub>	:	Constante para Roca Intacta.
MN	:	Meganewton.
MPa.	:	Mega Pascales.
MR	:	Relación del Módulo.
msnm.	:	Metros Sobre el Nivel del Mar.
ND	:	Numero de Discontinuidades.
NGI	:	Instituto Geotécnico de Noruega.
Pi	:	Punto de Inicio.
Pic	:	Punto de Inicio de Cruce.
Q	:	Índice de Calidad Tunelera.
RMR	:	Valoración del Macizo Rocoso.
RQD	:	Índice de Calidad de Roca.
RS2	:	Software Phase2.
R2, R3...	:	Grado de Estimación de Roca.
s, a	:	Constantes en Función de Características del Macizo Rocoso.
S	:	Factor de Amplificación del Suelo.
S <sub>0</sub>	:	Tipo de Perfil de Suelo para Roca Dura.
S <sub>1</sub>	:	Tipo de Perfil de Suelo para Roca con Grado de Fracturación.
Sh	:	Aceleración Sísmica Horizontal.
Sv	:	Aceleración Sísmica Vertical.
SRF	:	Factor de Reducción de Tensiones.
T <sub>P</sub>	:	Periodo que Define la Plataforma de Factor C.
T <sub>L</sub>	:	Periodo que Define el Inicio de la Zona del Factor C con Desplazamiento Constante.
U.E.A.	:	Unidad Económica Administrativa.
WGS84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.

$\lambda$	: Frecuencia de Discontinuidad.
$\sigma_c$	: Resistencia a la Compresión Uniaxial del Macizo Roco.
$\sigma_{ci}$	: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la Roca Intacta.
$\sigma'_{cm}$	: Resistencia Global del Macizo Roco.
$\sigma_t$	: Resistencia a Tracción del Macizo Roco.
$\sigma_1$	: Esfuerzo Principal Mayor.
$\sigma_3$	: Esfuerzo Principal Menor.
$\sigma'_{3max}$	: Esfuerzo de Confinamiento Máximo.
$c'$	: Fuerza Cohesiva.
$\phi'$	: Ángulo de Fricción.
$\alpha$	: Ángulo de Orientación Tensional.

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Índice de Calidad de la Roca – RQD. Fuente: Deere, 1967 .....	7
Tabla 2. Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR. Fuente: González, 2002 .....	8
Tabla 3. Corrección por la Orientación de las Discontinuidades. Fuente: González, 2002 .....	9
Tabla 4. Orientación de las Discontinuidades en el Túnel. Fuente: González, 2002 .....	9
Tabla 5. Calidad de Macizos Rocosos con relación al RMR <sub>89</sub> . Fuente: González, 2002 .....	9
Tabla 6. Clasificación Modificada del RMR <sub>89</sub> de Bieniawski en Subclases, para Túneles. Fuente: Romana, 2003.....	10
Tabla 7. Índice Geológico de Resistencia (GSI). Fuente: Hoek, 2002.....	11
Tabla 8. Valoraciones del Índice de Calidad Q. Fuente: Barton, Lien y Lunde, 1974 .....	13
Tabla 9. Coordenadas de la Bocamina de Mina San Sebastián.....	26
Tabla 10. Ruta de Accesibilidad con Movilidad al Área de Investigación – Mina San Sebastián. ....	27
Tabla 11. Ruta de Accesibilidad Mediante Caminata – Mina San Sebastián.....	28
Tabla 12. Precipitación Máxima desde el Año: 2019 al 2024, mediante la Estación Cachachi. ....	39
Tabla 13. Parámetros Sismorresistentes del Túnel de la Mina San Sebastián.....	43
Tabla 14. Caracterización Geomecánica del Macizo Rocoso del Túnel de la Mina San Sebastián.....	44
Tabla 15. Reporte de las Constantes Elásticas del Macizo Rocoso mediante el Software RocData - Mina San Sebastián.....	45
Tabla 16. Distribución de Esfuerzos Tensionales del Túnel de la Mina San Sebastián. ....	46
Tabla 17. Distribución Tensodeformacional alrededor de la Sección por Sistema de Diaclasas en el Medio: Plástico y Elastoplástico. ....	59
Tabla 18. Amplitud de Distribución Tensodeformacional alrededor de la Sección por Factor de Seguridad por Medio: Plástico y Elastoplástico.....	59
Tabla 19. Amplitud de Plastificaciones por Esfuerzo: Corte y Tensión por Medio: Plástico y Elastoplástico. ....	59
Tabla 20. Registro Geomecánico EG-01.....	75
Tabla 21. Registro Geomecánico EG-02.....	76
Tabla 22. Registro Geomecánico EG-03.....	77
Tabla 23. Registro Geomecánico EG-04.....	78

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Hoek-Brown Sistema de Clasificación del Macizo Rocoso GSI. Fuente: González, 2002 .....	11
Figura 2. Sistema Q - Estimación del Soporte de Roca, en función del $Q_{\text{frente}}$ (Clave y Hastial). Fuente: NGI, 2014 .....	13
Figura 3. Guía para estimar el Factor de Perturbación “D”. Fuente: Hoek y Brown, 2002 .....	16
Figura 4. Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown por el Método de la Equivalencia de Áreas. Fuente: Puell et al., 2004 .....	18
Figura 5. Proceso de Discretización por el Método de Elementos Finitos. Fuente: Rodríguez, 2018.....	21
Figura 6. Malla de Elementos Finitos de Dimensión D x D desarrollado en Software Phase2. Fuente: Jamchiki, et al., 2023 .....	22
Figura 7. Elementos de un Cuadro Cónico. Fuente: Cruz, 2004.....	23
Figura 8. Ubicación Política del Túnel de la Mina San Sebastián.....	26
Figura 9. Bocamina de Ingreso al Túnel Exploratorio de la Mina San Sebastián, ubicado en el Lado Frontal del Anticlinal Algamarca.....	28
Figura 10. Ruta de Acceso de Cajamarca al Centro Poblado Tres Cruces (Mina San Sebastián). Fuente: Google Maps, 2025.....	29
Figura 11. Reporte Meteorológico por Interpolación de Valores mediante: Temperatura °C y Precipitación, de la Estación Cachachi. Fuente: SENAMHI, 2024.....	30
Figura 12. Sección de Galería conformada por Depósito Coluvio-Deluvial con Fragmentos de Roca Angulosa de Diámetro Mayor a 3 pulgadas, con Estructura Desordenada poco Compacta, en Matriz Englobante de Finos.....	36
Figura 13. Roca Arenisca de Color Blanquecino de la Formación Chimú ubicada en el Pi+80.50 m. constituyendo la Caja: Techo y Piso del Túnel de la Sección en Forma de Baúl .....	36
Figura 14. Río Condebamba de Cauce Variable, con Dirección de Flujo de Orientación SE-NW y W-E.....	37
Figura 15. Visualización de la Quebrada Choloque con Orientación SW-NE, ubicándose a Distancia 850 m.....	38
Figura 16. Variograma de Barras de la Precipitación Máxima en 24 horas - Estación de Cachachi. Fuente: SENAMHI, 2019 a 2024.....	39

Figura 17.	Acuífero de Agua Subterránea filtra en la Clave ubicado en el Pi+116.50 m., en una Apertura de Junta 1.50 cm. a 2.50 cm. con $Q = 2.45 \text{ Lt/s}$ , manteniendo Flujo Constante de Agua en forma de Chorro.....	40
Figura 18.	Filtraciones de Agua en la Clave y Hastiales en el Pic+4.38 m.; formándose, por la Constante Humedad, Zonas Blanquecinas de Mineral Hidrocincita de Espesor 5 mm. ....	41
Figura 19.	Cuña Tetraédrica ubicada en la Clave del Túnel, delimitada por Tres Familias de Juntas, en el Pi+80.25 m. ....	42
Figura 20.	Delimitación de Tres Familias de Discontinuidades, en el Macizo Roco de la Formación Chimú, formando Formas Geométricas de acuerdo con la Proyección de sus Caras Libres.....	42
Figura 21.	Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas, EG-01.....	47
Figura 22.	Comportamiento Tensodeformacional del Sistema de Diaclasas está concentrada en la Perifería del Túnel, formando Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.276 m. a 1.125 m.) y Elastoplástico (0.10 m. a 0.420 m.), EG-01.....	48
Figura 23.	La Sección del Túnel en la EG-01, muestra Plastificaciones Constantes por Esfuerzos: Cortantes y Tensionales, afectando al Túnel progresivamente, por estar constituido por Depósito Coluvio-Deluvial, siendo necesario Sostenimiento. ....	48
Figura 24.	Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-01, formando Aureola Circular en el Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.214 m. a 0.610 m.) y Elastoplástico (0.231 m. a 0.408 m.). .....	49
Figura 25.	Variación del Campo Tensional mediante la Afectación de Agua Subterránea está ocasionando Inestabilidades formando Elipse, siendo el Esfuerzo Horizontal de Mayor Magnitud afectando al Túnel en la EG-01.....	49
Figura 26.	Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-02.....	50
Figura 27.	Sistema Diaclasas sometida al Campo Tensodeformacional de Forma Elíptica, en la Perifería del Túnel forma Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.256 m. a 0.617 m.) y Elastoplástico (0.201 m. a 0.360 m.), EG-02.....	51

Figura 28.	La EG-02 muestra Plastificaciones de Baja Incidencia solo alojándose en Sectores Puntuales del Túnel, formando Pequeñas Aureolas de Deformación Rocosa.....	51
Figura 29.	Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-02, formando Aureola Circular en el Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.164 m.) y Elastoplástico (0.163 m. a 0.446 m.) .....	52
Figura 30.	Variación del Campo Tensional formando una Elipse Tensodeformacional relacionada con el Esfuerzo Mayor Horizontal, ocasionando Instabilidades de Mayor Magnitud afectando al Túnel en la EG-02 .....	52
Figura 31.	Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-03. ....	53
Figura 32.	Envolventes del Campo Tensodeformacional formado por el Sistema de Diaclasas sometida al de Forma Elíptica, formando Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.080 m. a 0.586 m.) y Elastoplástico (0.099 m. a 0.295 m.), EG-03.....	54
Figura 33.	La EG-03 muestra Plastificaciones de Baja Incidencia, solo alojándose en Sectores de Intersección de Juntas formando Pequeñas Aureolas de Deformación Rocosa, no superando los 0.10 m.....	54
Figura 34.	Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-03, formando una Aureola Elíptica alrededor del Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.100 m.) y Elastoplástico (0.050 m. a 0.214 m.) .....	55
Figura 35.	La Variación del Campo Tensional muestra una Elipse Tensodeformacional formando Inestabilidades en la EG-03, proyectándose desde: 0.78 m. a 0.85 m. en el Medio Plástico. ....	55
Figura 36.	Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-04.....	56
Figura 37.	Campo Tensodeformacional del Sistema de Diaclasas sometida al de Forma Elíptica Subvertical, formando Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.750 m. a 0.733 m.) y Elastoplástico (0.080 m. a 0.507 m.), EG-04.....	57
Figura 38.	La EG-04 muestra Rocas de Buena Calidad de Superficie Inalterada, plasmando Bajas Plastificaciones, las cuales se forman en Sectores Puntuales del Túnel, no afectando su Estabilidad. ....	57

Figura 39.	Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-04, formando Aureola Irregular por ser Roca de Buena Calidad de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.008 m.) y Elastoplástico (0.000 m. a 0.030 m.).	58
Figura 40.	La Interacción de Agua Subterránea está formando Campos Tensionales de Amplitud Elíptica, afectando la Estabilidad del Túnel desde: 0.75 a 0.85 m., en la EG-04.	58

## **RESUMEN**

La Mina San Sebastián se ubica en el centro poblado Tres Cruces, distrito Cachachi, provincia Cajabamba y región Cajamarca, realizando exploraciones metálicas. Se aplicó metodología cuantitativa, transversal, diseño no experimental y método deductivo - inductivo. Se plantearon objetivos: realizar el cartografiado geológico y caracterización geomecánica del túnel, analizar el estado tensional mediante el software RS2, definir las zonas críticas del túnel de la Mina San Sebastián y proponer el tipo de sostenimiento por el método Q de Barton. Litológicamente se reconoció Depósito Coluvio-Deluvial conformado por fragmentos de roca angulosa y matriz englobante limo arcilloso, desde Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m.; y Formación Chimú compuesto por arenisca de grosor: 0.30 m. a 0.45 m. con orientación DD/D = 220°/48°SW desde Pi+12.15 m. a Pi+120.00 m. Así mismo, el medio plástico afecta tanto: hastial desde 0.080 m. a 0.343 m., clave desde 0.539 m. a 1.082 m. y piso desde 0.475 m. a 0.801 m.; y el medio elastoplástico afecta al hastial desde 0.080 m. a 0.448 m., a la clave desde 0.153 m. a 0.379 m. y al piso desde 0.120 m. a 0.281 m.; afectando la estabilidad del túnel; presentando dos zonas críticas ubicadas: Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. conformado por Depósito Coluvio-Deluvial; y Pi+116.50 m. conformado por falla geológica de apertura 2.50 cm. a 5.00 cm. drenando agua de la clave con caudal  $Q = 2.45 \text{ Lt/s}$ . Como medida de sostenimiento se planteó cuadros cónicos de madera.

Palabras clave: Túnel, calidad de roca, campo tensodeformacional, modelo numérico e inestabilidad.

## **ABSTRACT**

The San Sebastián Mine is located in the Tres Cruces population center, Cachachi district, Cajabamba province and Cajamarca region, carrying out metallic explorations. A quantitative, cross-sectional methodology, non-experimental design, and deductive-inductive method were applied. The objectives were: to perform geological mapping and geomechanical characterization of the tunnel; to analyze the stress state using RS2 software; to define the critical zones of the San Sebastián Mine tunnel; and to propose the type of support using Barton's Q method. Lithologically, a Colluvium-Deluvial Deposit was recognized, consisting of angular rock fragments and an enclosing clayey silt matrix, from Pi + 00.00 m. to Pi + 12.15 m.; and a Chimú Formation composed of sandstone with a thickness of 0.30 m. to 0.45 m. with a DD / D = 220 ° / 48 ° SW orientation from Pi + 12.15 m. to Pi + 120.00 m. Likewise, the plastic environment affects both: gable from 0.080 m. to 0.343 m., keystone from 0.539 m. to 1.082 m. and floor from 0.475 m. to 0.801 m.; and the elastoplastic environment affects the gable from 0.080 m. to 0.448 m., and the keystone from 0.153 m. at 0.379 m. and to the floor from 0.120 m. to 0.281 m.; affecting the stability of the tunnel; presenting two critical zones located: Pi + 00.00 m. to Pi + 12.15 m., formed by a Colluvium-Deluvial Deposit; and Pi + 116.50 m., formed by a geological fault with an opening of 2.50 cm. to 5.00 cm., draining water from the key with a flow rate of  $Q = 2.45 \text{ Lt} / \text{s}$ . As a support measure, conical wooden frames were proposed.

**Keywords:** Tunnel, rock quality, stress-strain field, numerical model and instability.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

El túnel de la Mina San Sebastián está ubicada en el centro poblado Tres Cruces, distrito Cachachi, provincia Cajabamba y región Cajamarca; correspondiente a la concesión Acumulación Shahuindo, por REINFO de formalización minera, enmarcada en la realización de actividades exploratorias de minería metálica en dicho túnel, cortando a geoestructuras con relleno de 3 mm. a 10 mm. constituidos por mineralización: Óxidos, Cu, Ag y Au y también discontinuidades que delimitan la estabilidad del túnel por las grietas de tracción del macizo rocoso conformado por areniscas de grano medio de color blanquecino de la Formación Chimú de espesor: 0.30 m. a 0.45 m. Así mismo alrededor del túnel, los flujos de agua y humedad son permanentes dadas por permeabilidad tanto primaria y secundaria, mostrando afectaciones progresivas de desprendimiento al disminuir la cohesión y ángulo fricción de la roca, formando cuñas tanto tetraédrica, prismática, truncada y doblemente truncada, ya sea en clave y hastiales del túnel; siendo afectadas por la sismicidad a causa de la perforación, voladura, movimientos geotectónicos, actividades de los colindantes y avances de la misma empresa minera, siendo inducidas constantemente por presiones gravitatorias de la columna de roca a causa de la abertura del túnel; afectando la seguridad de los trabajadores constantemente por los cambios tensionales en sectores del túnel evidenciándose por desprendimiento de rocas y deformaciones de la sección. Sin embargo, la caracterización geomecánica del túnel definiría mejoramiento por sostenimiento o desquinchado de roca, relacionándose con la calidad de roca y comportamiento del estado tensional de la sección subterránea; siendo la formulación del problema ¿La evaluación geomecánica determinará la inestabilidad del túnel de la Mina San Sebastián, ubicada el centro poblado Tres Cruces, distrito Cachachi, provincia Cajabamba?

Planteando como hipótesis, que el túnel de la Mina San Sebastián está emplazado en areniscas de la Formación Chimú evidenciándose inestabilidades en

las secciones subterráneas por la acumulación tensional gravitatoria progresiva, siendo delimitada por la formación de cuñas geoestructurales, requiriendo sostenimiento de acuerdo con la calidad de roca, mejorando así la seguridad de avance de los trabajadores. La justificación de la investigación busca como fin estabilizar la sección del túnel compuesta por areniscas de la Formación Chimú de acuerdo a la calidad de roca, geoestructuras, infiltración, sismicidad y carga gravitatoria; siendo sectorizado por la caracterización geomecánica de la galería principal del túnel de la Mina San Sebastián, para mejores exploraciones: Geológicas y geomecánicas de la empresa minera, así logrando mayor seguridad en el sostenimiento subterráneo, en los trabajadores y en el avance de productividad de extracción de mineral metálico.

Los alcances de la investigación son: Descriptivo, correlacional y explicativa; con limitaciones de bajo presupuesto para realizar ensayos especiales de medición de la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso. Su objetivo general es definir la evaluación geomecánica para determinar la inestabilidad del túnel de la Mina San Sebastián; y los objetivos específicos son: realizar el cartografiado geológico y caracterización geomecánica del túnel; analizar el estado tensional mediante el software RS2; definir las zonas críticas del túnel de la Mina San Sebastián; y proponer el tipo de sostenimiento por el método Q de Barton.

El desarrollo de la tesis está fundamentado por capítulos, conformado por: **Capítulo I** que contiene el planteamiento y desarrollo del problema de investigación; el **capítulo II** está dado por los antecedentes, marco teórico y definición de términos básicos, siendo el capítulo netamente que da la relevancia a la investigación mediante investigaciones relacionadas con el título planteado; el **capítulo III** aporta con generalidades de la zona de investigación, metodología y etapas a tomar en cuenta en su desarrollo; y finalmente el **capítulo IV** está dado por el desarrollo y redacción describiendo información tanto cuantitativa y cualitativa del área de investigación, aportando con información real y consistente siendo de vital importancia para el aporte científico basado en plasmar información de la Mina San Sebastián.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

##### 2.1.1 Internacionales

**Moreira de Alencar y De Andrade (2021)**, mediante el estudio “Sobre el diseño del hormigón proyectado reforzado con fibra aplicado como soporte primario de roca en las excavaciones mineras subterráneas de Cuiabá”. Sostuvieron como objetivo evaluar el sostenimiento con hormigón proyectado reforzado con fibras de acero (SF) y fibras de polipropileno (PPF). Concluyendo que el sostenimiento con hormigón proyectado reforzado con fibras de acero de longitud de 35 mm. y fibras de polipropileno de longitud 54 mm. alcanzan módulos elásticos de 210 GPa y 7 GPa respectivamente; a partir de lo cual propusieron como sostenimiento adecuado, para las excavaciones, la aplicación de PPF en una dosificación de 6.0 kg/m<sup>3</sup>.

**Lascano (2022)**, en la tesis: “Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de la abscisa 0+2100 a la 0+2400 del decline localizado en el área minera Cascabel”. Concluye que de la abscisa 0+2100 a la 0+2400, los valores por el criterio RMR son de 42 a 55 (roca de calidad media); mientras que por el índice Q de Barton son de 1.40 a 3.97 (roca de calidad mala desde la abscisa 0+2100 a 0+2380) y de 5.51 a 7.12 (roca de calidad media desde la abscisa 0+2380 a 0+2400); además el análisis tensodeformacional presenta valores de hasta 3.90 mm. en hastiales y de hasta 4.55 mm. en el techo, para lo cual propuso sostenimiento con pernos Swellex de 3 m. de longitud y shotcrete de 5 a 6 cm.

**Gómez (2022)**, en la tesis: “Caracterización, zonificación geomecánica y recomendación del sostenimiento necesario para la estabilidad de labores y temporales y permanentes del macizo rocoso en el Nivel 1712 del cuerpo Zeus de

la Mina Roble". Sostuvo como objetivo determinar los elementos necesarios para la estabilidad de labores temporales y permanentes. Concluyendo que en dicho nivel, las rocas de calidad mala son el Chert Tipo 2 y el Sulfuro Tipo 1 con RMR de 37.3 y 36.5 respectivamente, y las rocas de calidad regular son el Sulfuro Tipo 3 y Dique Tipo 2 con RMR de 52.3 y 52.2 respectivamente, para lo cual propuso sostenimiento con shotcrete, malla y pernos helicoidales espaciados a 1.5 m.

## 2.1.2 Nacionales

**Millán (2022)**, en la tesis "Evaluación geomecánica de la masa rocosa para selección del sostenimiento – Minera Animón 2022". Se tiene como objetivo determinar cómo influye la evaluación geomecánica en la elección del sistema de sostenimiento. Concluyendo que en las labores permanentes, los macizos rocosos son de calidad mala de tipo IV-A, requiriendo sostenimiento con shotcrete de 3 pulgadas de grosor con malla electrosoldada más pernos hydrabolts sistemáticos de 7 pies de largo; y en las labores temporales, los macizos rocosos son de calidad mala de tipo IV-B, requiriendo sostenimiento con shotcrete de 2 pulgadas de grosor con malla electrosoldada y pernos split sets sistemáticos de 7 pies de largo.

**Rodríguez (2021)**, en la tesis "Caracterización del macizo rocoso para proponer un diseño sostenimiento en la compañía minera Marsa S.A 2021". Concluye que el macizo rocoso, según RMR, presenta baja calidad geomecánica de Tipo: IV-A y IV-B, además la zona plástica (en las labores) afecta a la corona hasta un promedio de 1.20 m. y en los hastiales hasta un promedio de 2 m. A partir de lo cual propuso como sostenimiento shotcrete de 3 pulgadas más pernos Swellex de 7 pies con espaciado de 0.9 m.

**Marin (2023)**, en la tesis "Evaluación geomecánica para el diseño de sostenimiento de las zonas de producción Norte Unidad Minera acumulación Parcoy, La Libertad, 2023". Cuyo objetivo fue analizar la evaluación geomecánica para el diseño del sostenimiento de las zonas de producción norte y sur de la Unidad Minera Parcoy. Concluyendo que existen 4 litologías: diorita, granito, granodiorita y tonalita con valores de RMR de 55, 47, 40 y 27 respectivamente, clasificándolo como macizos rocosos de calidad: Regular III-A, Regular III-B, Mala

IV-A y Mala IV-B, proponiendo sostenimiento con pernos posimix de 6 pies (para roca de calidad regular) y malla reforzada con shotcrete (para roca mala).

**García (2023)**, en la tesis “Evaluación geomecánica del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento y estabilidad en la zona de explotación Hércules, Unidad Minera Huancapeti, 2023”. Sostuvo como objetivo analizar cómo la evaluación geomecánica del macizo rocoso influye en la mejora de la estabilidad y del sistema de sostenimiento en la zona de explotación Hércules. Concluyendo que el macizo rocoso en la zona Hércules presenta clasificaciones de RMR en: caja techo de 35 a 65, estructura mineralizada de 25 a 55 y caja piso de 55 a 35, siendo el macizo rocoso de calidad mala, regular y buena, proponiendo sostenimiento con shotcrete, pernos helicoidales con cartuchos de resina y malla electrosoldada.

**Mendoza (2022)**, en la tesis “Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la construcción y sostenimiento de la chimenea-2226, por el método Raise Climber Mina Lourdes en la U.E.A Parcoy (Consorcio Minero Horizonte S.A)”. Sostuvo como objetivo evaluar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso durante la construcción y sostenimiento de la chimenea-2226 mediante el método Raise Climber. Concluyendo que la chimenea-2226 está constituida por roca del tipo IV-A de mala calidad, para el cual propuso sostenimiento con pernos de anclaje de 2.40 m. de longitud con resina, espaciados cada 1.0 m., complementados con malla electrosoldada y shotcrete de 5 cm.

### **2.1.3 Locales**

**Castrejon (2024)**, en la tesis “Estallido de rocas del crucero El Ñato, Nivel 2880 - Empresa Minera HNS Consorcio S.R.L., San Miguel de Algamarca – Cajabamba - Cajamarca”. Concluyó que dicho crucero está emplazado en las Formaciones: Chimú, Santa y Carhuaz de orientación Az/Bz = N140°/62°SW; ubicado en el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca con Az = N125°, cortado por diques volcánicos compuestos por: Dacita, riolita y andesita. Constituido por rocas de calidad: mala, media y buena; originando cambios tensodeformacionales, plasmando aureolas: Semicirculares, elípticas y homogéneas, proyectando el medio plástico: 0.67 m. a 1.80 m., de acuerdo a la calidad de roca.

**Benel (2020)**, en la tesis “Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo Cajamarca”. Sostuvo como objetivo evaluar el comportamiento geomecánico del Nivel 3 de la Mina Paredones. Concluyó que el macizo rocoso tiene calidad RMR: mala (EG-2), media (EG-1, EG-3 y EG-5) y buena (EG-4), y calidad de Q de Barton: muy mala (EG-2), mala (EG-1), media (EG-3 y EG-5) y buena (EG-4); presentando tres zonas inestables: altamente peligrosa, peligrosa y moderadamente peligrosa, proponiendo sostenimiento por cuadros de madera rectos (EG-1) y cónicos (EG-2), puntales de madera (EG-3) y pernos de anclaje (EG-4 y EG-5).

**Soberón (2024)**, en su tesis “Propuesta de sostenimiento y controles para reducir la liberación de energía del Nivel 4 de Mina Paredones, San Pablo – Cajamarca”. Tiene como objetivo proponer un sistema de sostenimiento y establecer controles para disminuir la liberación de energía en las zonas críticas. Concluyendo que la calidad del macizo rocoso varía entre: mala (EG-5), regular (EG-1) y buena (EG-2, EG-3 Y EG-4); existiendo sectores con distintos grados de inestabilidad, siendo el by-pass del nivel 4 el más crítico, para lo cual se propuso sostenimiento con anclajes adherentes – sistemáticos de 8 pies de longitud de diámetro de 25 mm. junto con shotcrete de 4 pulgadas de espesor.

**Alfaro y Muguerza (2021)**, en la tesis “Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento del Nv.2 Mina Nueva Esperanza, Consorcio minero HNS – Algamarca, 2021”. Sostuvieron como objetivo realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento. Concluyendo que se evaluaron 8 estaciones geomecánicas de la Formación Chimú con valores de RMR entre 35 y 70, valores de Q de Barton entre 1 y 10, y valores de GSI entre 40 y 70, clasificando a la roca desde calidad mala, regular a buena, proponiendo sostenimiento con pernos sistemáticos de 2 a 4.5 m. de longitud y espaciados entre 1 a 2 m., además de malla metálica y shotcrete de 150 a 200 mm. de espesor.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 Caracterización Geomecánica

La caracterización del macizo rocoso influye en el comportamiento de la estabilidad de túneles, siendo representado por valores individuales de calificación asociados con los proyectos de minería enfocados a afloramientos rocosos. Presentando secuencias de evaluación realizadas a partir de datos geomecánicos mediante: recopilación de información, etapas de exploración o estudio de factibilidad de proyectos mineros, proporcionando guías útiles para seleccionar el apropiado método de explotación minero, teniendo clasificaciones como: índice de calidad de roca (RQD), valoración del macizo rocoso (RMR), índice de resistencia geológica (GSI) e índice de calidad tunelera (Q) (Brady y Brown, 2004).

- **Índice de Calidad de Roca (RQD)**

Introducido por Deere (1964) como índice que evalúa cuantitativamente la calidad de la roca, obteniéndose mediante el registro de núcleos perforados o mediante el uso de diferentes correlaciones, como la correlación entre: RQD y frecuencia de discontinuidad ( $\lambda$ ), para diferentes formas de distribución de espaciado de discontinuidad (Priest y Hudson, 1976; Sen y Kazi, 1984; Sen, 1993).

$$RQD = 100 * e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\lambda = \text{Número de discontinuidades} / \text{Longitud} \quad \text{Ecuación 2}$$

Tabla 1. Índice de Calidad de la Roca – RQD.

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Excelente

Fuente: Deere, 1967.

- **Valoración del Macizo Rocoso (RMR)**

Propuesto por Bieniawski (1989), desarrollado inicialmente para túneles realizando mejoramientos en los últimos años para la estimación del módulo de deformación in situ y resistencia del macizo rocoso. Dividiéndolo al macizo rocoso en dominios estructurales limitado por unidades estructurales (discontinuidades), representando las características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones de campo. Por consiguiente, el RMR utiliza seis parámetros que se determinan en campo (Hudson, 2010), como: resistencia de la matriz rocosa, RDQ, espaciado de discontinuidades, estado de las discontinuidades, flujo de agua freática y orientación de discontinuidades (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Parámetros de Clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)

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

Fuente: González, 2002.

Tabla 3. Corrección por la Orientación de las Discontinuidades

Dirección y buzamiento	Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación Túneles	0	-2	-5	-10	-12

Fuente: González, 2002.

Para obtener la puntuación para la corrección por la orientación de las discontinuidades se debe tener en cuenta la Tabla 4.

Tabla 4. Orientación de las Discontinuidades en el Túnel

Dirección perpendicular al eje del túnel			Dirección paralela al eje del túnel			Buz. 0°-20°. Cualquier dirección
Excavación con buzamiento	Excavación contra buzamiento					
Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

Fuente: González, 2002.

Por consiguiente, la valoración RMR (Tabla 5), se obtiene de la suma de puntuaciones obtenidas en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 5. Calidad de Macizos Rocosos con relación al RMR<sub>89</sub>.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción
I	Muy buena	100 - 81	> 4	> 45°
II	Buena	81 - 61	3 - 4	35° - 45°
III	Media o Regular	60 - 41	2 - 3	25° - 35°
IV	Mala	40 - 21	1 - 2	15° - 25°
V	Muy mala	< 20	< 1	< 15°

Fuente: González, 2002.

Cabe señalar que, según Romana (2003), indica que en obras subterráneas como túneles, el método de clasificación geomecánica RMR<sub>89</sub> de Bieniawski puede

resultar limitada, ya que los macizos rocosos de clase I (Muy buena) son muy poco comunes porque no abundan los macizos rocosos muy poco diaclasados y de gran calidad; además la clase III (Media o Regular) son normalmente más frecuentes, pero cubren un rango muy amplio; asimismo la clase IV (Mala) es demasiada amplia, lo que evidencia la necesidad de una clasificación más detallada, por ello, propuso ampliar el sistema a diez subclases, permitiendo una mejor caracterización del macizo rocoso en función de sus condiciones reales.

Tabla 6. Clasificación Modificada del RMR<sub>89</sub> de Bieniawski en Subclases, para Túneles

Categoría	RMR	Código de colores	Descripción Bieniawski	Descripción Romana
I	I-A 91 - 100		Muy buena	Excelente
	I-B 81 - 90			Muy buena
II	II-A 71 - 80		Buena	Buena a muy buena
	II-B 61 - 70			Buena a media
III	III-A 51 – 60		Media	Media a buena
	III-B 41 – 50			Media a mala
IV	IV-A 31 – 40		Mala	Mala a media
	IV-B 21 - 30			Mala a muy mala
V	V-A 11 – 20		Muy mala	Muy mala
	V-B 0 – 10			Pésima

Fuente: Romana, 2003.

- **Índice de Resistencia Geológica (GSI)**

Propuesto por Hoek y Brown (1997), para macizos rocosos: resistentes y débiles, constituye un método de clasificación geomecánica que se fundamenta en el reconocimiento y evaluación de dos aspectos esenciales para su determinación: la estructura geológica del macizo rocoso y el estado de las superficies de sus discontinuidades. Cabe señalar que el índice GSI inicialmente fue desarrollado para obtener los parámetros para el criterio de falla de Hoek y Brown. (Osinergmin, 2017).

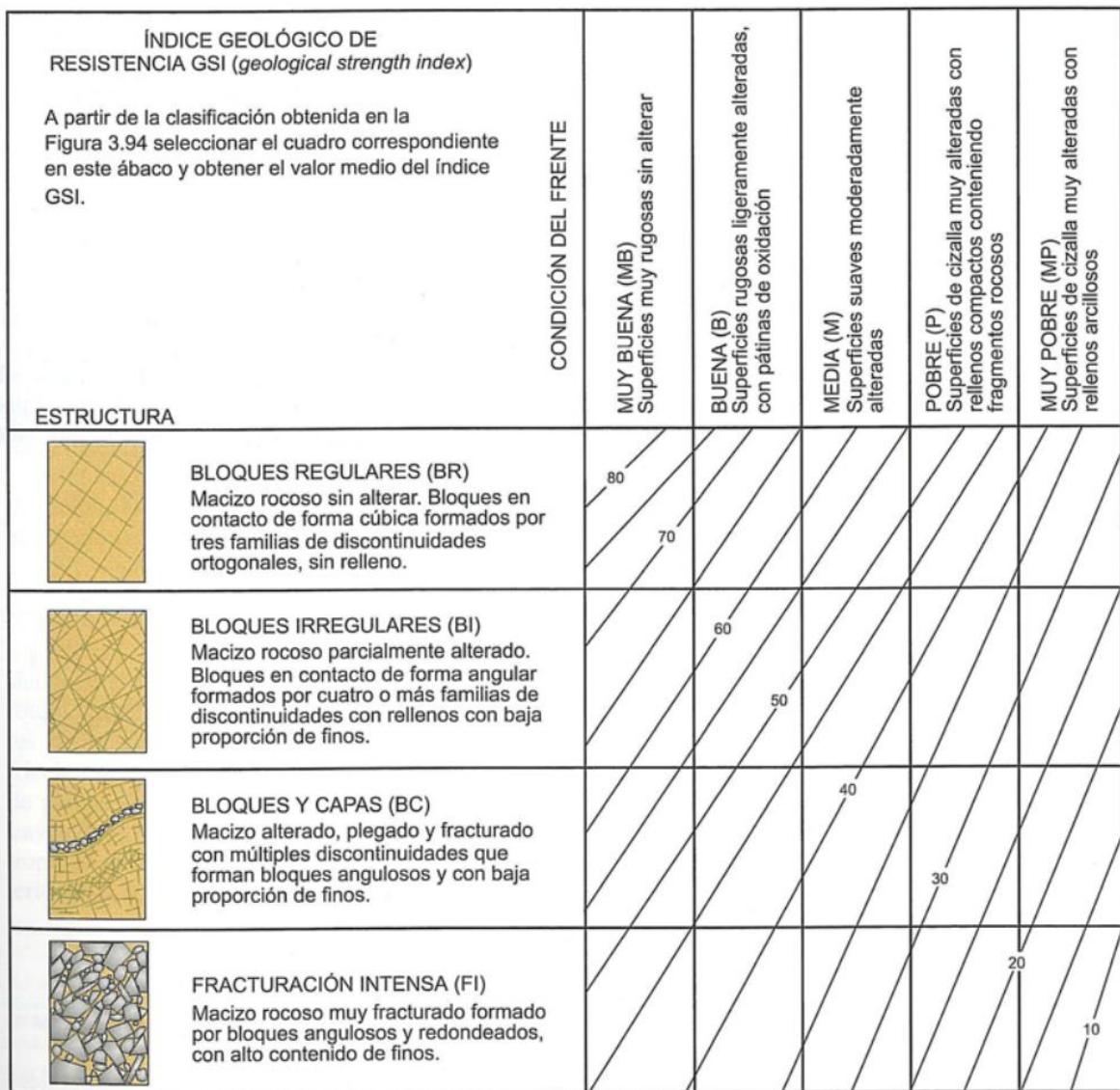


Figura 1. Hoek-Brown Sistema de Clasificación del Macizo Roco GSI.

Fuente: González, 2002.

Por consiguiente, la valoración GSI de acuerdo al tipo y calidad del macizo rocoso, se encuentra en la Tabla 7, que a continuación se presenta:

Tabla 7. Índice Geológico de Resistencia (GSI).

Calidad del macizo	Tipo	GSI
Muy mala	V	0 - 20
Mala	IV	21 – 40
Regular	III	41 – 60
Buena	III	61 – 80
Muy buena	I	81 - 100

Fuente: Hoek, 2002.

- **Índice de Calidad Tunelera (Q)**

Propuesto por Barton et al. (1974), del Instituto Geotécnico de Noruega, es un índice de calidad de excavación de túneles (Q) para las características del macizo rocoso y sostenimiento del túnel. El valor del Q varía en una escala logarítmica desde 0.001 hasta un máximo de 1000 (Tabla 8) y se calcula mediante:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \times \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \times \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

La ecuación de Q de Barton está constituida por tres términos que representan lo siguiente:

Tamaño de los bloques: RQD/Jn

Resistencia al corte entre los bloques: Jr/Ja

Influencia del estado tensional: Jw/SRF

Donde, los seis parámetros necesarios para el cálculo del Q de Barton se describen a continuación:

Índice de calidad de la roca: RQD

Índice de diaclasado: Jn

Índice de rugosidad de las discontinuidades: Jr

Índice de alteración de las discontinuidades: Ja

Factor de reducción por la presencia de agua: Jw

Factor de reducción de tensiones: SRF

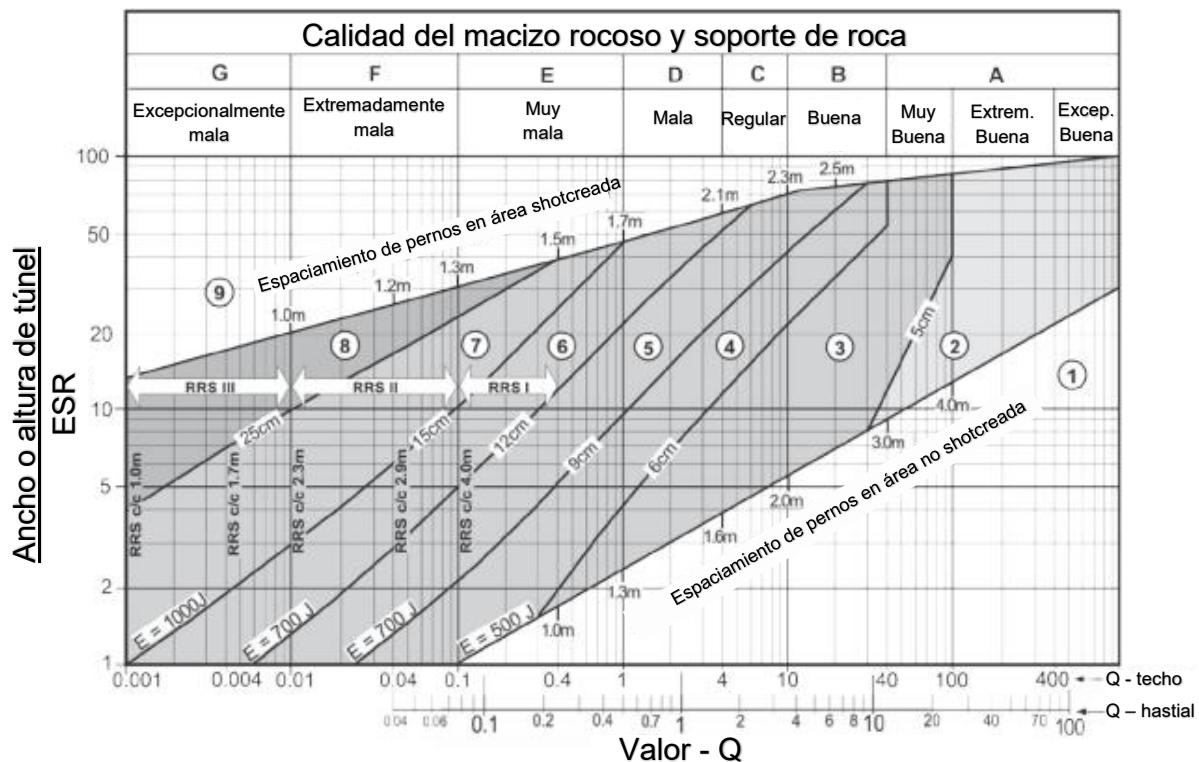


Figura 2. Sistema Q - Estimación del Soporte de Roca, en función del  $Q_{\text{frente}}$  (Clave y Hastial).

Fuente: NGI, 2014.

El valor Q referente a la Figura 2, es para el soporte en el techo. Para el soporte en el hastial se usa la Figura 2 pero con el valor ajustado de Q siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Para } Q > 10, \text{ usar:} & \quad Q_{\text{hastial}} = 5Q \\
 \text{Para } 0.10 < Q < 10, \text{ usar:} & \quad Q_{\text{hastial}} = 2.5Q \\
 \text{Para } Q < 0.10, \text{ usar:} & \quad Q_{\text{hastial}} = Q
 \end{aligned} \tag{Ecuación 4}$$

Tabla 8. Valoraciones del Índice de Calidad Q.

<b>Q</b>	<b>Tipo de roca</b>
0.001 – 0.01	Excepcionalmente mala
0.01 – 0.1	Extremadamente mala
0.1 – 1	Muy mala
1 – 4	Mala
4 – 10	Media
10 – 40	Buena
40 – 100	Muy buena
100 – 400	Excepcionalmente buena
400 – 1000	Extremadamente buena

Fuente: Barton, Lien y Lunde, 1974.

## 2.2.2 Estimación de Esfuerzos Insitu

Desarrollado por Sheorey (1994), permitió estimar el valor del coeficiente de reparto de tensiones (K), basado en las constantes elásticas el macizo rocoso y profundidad de excavación (H), mediante la siguiente ecuación:

$$K = 0.25 + 7E_h \left( 0.001 + \frac{1}{H} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

H : Profundidad con respecto a la superficie (m.).

$E_h$  : Módulo de deformación (GPa.) de la roca medido en dirección horizontal

K : Coeficiente de reparto de tensiones.

## 2.2.3 Criterio de Rotura de Hoek - Brown

El criterio generalizado de Hoek-Brown es un modelo empírico de rotura que define la resistencia del macizo rocoso a partir de las tensiones principales mayores y menores. Este criterio permite obtener envolventes de resistencia que se ajustan a los resultados obtenidos en ensayos triaxiales realizados sobre roca intacta, así como fallos observados en macizos rocosos fracturados (Hoek y Brown, 2002).

El criterio generalizado de resistencia de Hoek-Brown es no lineal y se expresa en términos de las tensiones principales mayor ( $\sigma'_1$ ) y menor ( $\sigma'_3$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\sigma'_1, \sigma'_3$  : Esfuerzos principales efectivos mayor y menor, en MPa.

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

$m_b$  : Valor reducido (para macizos rocosos) de la constante  $m_i$  (para la roca intacta).

s, a : Constantes en función de las características del macizo rocoso.

De acuerdo con estudios recientes, los parámetros del criterio generalizado de Hoek-Brown ( $m_b$ ,  $s$  y  $a$ ) se determinan a través de las siguientes ecuaciones:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Siendo  $D$  un factor que depende del grado de perturbación (Figura 3) al cual el macizo rocoso ha sido sometido (Hoek y Brown, 2002).

La resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso ( $\sigma_c$ ) se obtiene al establecer  $\sigma'_3 = 0$  en la ecuación 6:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$\sigma_c$  : Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso, en MPa.

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

$s, a$  : Constantes en función de las características del macizo rocoso.

Además, la resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) se puede calcular a partir de:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\sigma_t$  : Resistencia a tracción del macizo rocoso, en MPa

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

$m_b$  : Valor reducido (para macizos rocosos) de la constante  $m_i$  (para la roca intacta).

$s$  : Constante en función de las características del macizo rocoso.

El criterio de falla de Hoek-Brown también permite calcular el módulo de deformación de macizos rocosos ( $E_m$ ) dado por:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{(\text{GSI}-10)/40} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$E_m$  : Módulo de deformación del macizo rocoso, en MPa.

D : Factor de perturbación.

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

GSI : Índice de Resistencia Geológica.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D = 0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.  Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contra bóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	D = 0  D = 0,5
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante.	D = 0,8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	D = 0,7 Buena Voladura  D = 1,0 Mala Voladura
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.  En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	D = 1,0 Voladura de producción  D = 0,7 Excavación mecánica

Figura 3. Guía para estimar el Factor de Perturbación "D"

Fuente: Hoek y Brown, 2002.

#### 2.2.4 Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown

Según Puell et al. (2004), para aplicar los parámetros de cálculo de Mohr–Coulomb, pero teniendo en cuenta el criterio de Hoek–Brown, es necesario linealizar la envolvente curva de falla de Hoek–Brown, ya que esta última es inherentemente no lineal, mientras que el modelo Mohr–Coulomb asume un comportamiento lineal. Recordar que, la envolvente de rotura lineal del modelo Mohr–Coulomb se representa en el plano  $\sigma'_n - \tau$  mediante la siguiente expresión ampliamente conocida:

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg}\phi' \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo cortante en el plano de falla, en MPa.

$\sigma'_n$  : Esfuerzo normal en el plano de falla, en MPa.

$c'$  : Fuerza cohesiva, en MPa.

$\phi'$  : Ángulo de fricción, en °.

Al linealizar la envolvente curva de rotura de Hoek–Brown, se obtiene una ecuación lineal que se asemeja más a la del modelo de Mohr–Coulomb y además se obtienen ecuaciones que permiten determinar el ángulo de fricción y la resistencia cohesiva para el macizo rocoso, que se detallará en el método de la equivalencia de áreas (Puell et al., 2004).

- ***Linealización por el Método de la Equivalencia de Áreas***

Dado que gran parte del software geotécnico continúa utilizando el criterio de falla de Mohr–Coulomb, es necesario obtener los valores equivalentes de cohesión y ángulo de fricción para cada macizo rocoso. Para ello, los autores Hoek et al. (2002), proponen el método de la equivalencia de áreas, que consiste en ajustar una relación lineal que equilibre las áreas comprendidas entre la envolvente no lineal de Hoek–Brown y su aproximación lineal de Mohr–Coulomb como se logra apreciar en la Figura 4, dentro de un rango de esfuerzo principal menor definido por  $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma'_{3\max}$ , donde  $\sigma_t$  es la resistencia a tracción,  $\sigma'_3$  es el esfuerzo principal

menor y  $\sigma'_{3\max}$  es el esfuerzo de confinamiento máximo que se espera y que se tendrá que calcular.

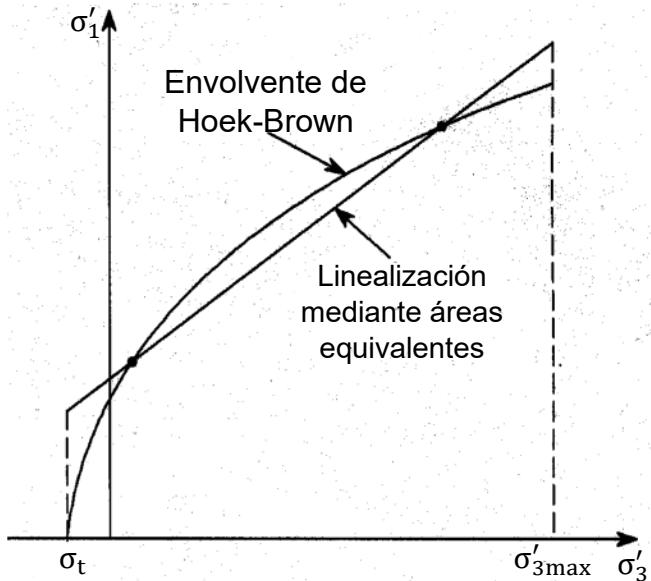


Figura 4. Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown por el Método de la Equivalencia de Áreas.  
Fuente: Puell et al., 2004

Según Puell et al. (2004), al linealizar el criterio de rotura de Hoek–Brown se obtiene una relación lineal equivalente al modelo de Mohr–Coulomb. Dicha linealización permite expresar los esfuerzos principales mayor ( $\sigma'_1$ ) y menor ( $\sigma'_3$ ) en función de los parámetros de cohesión ( $c'$ ) y del ángulo de fricción ( $\phi'$ ), mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_1 = \frac{2 \cdot c' \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \left( \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \cdot (\sigma'_3) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$\sigma'_1, \sigma'_3$  : Esfuerzos principales efectivos mayor y menor, en MPa.

$c'$  : Fuerza cohesiva, en MPa.

$\phi'$  : Ángulo de fricción, en °.

Obteniéndose, a partir de este tipo de linealización, como resultados para el ángulo de fricción ( $\phi'$ ) y la cohesión ( $c'$ ) las siguientes ecuaciones:

$$\phi' = \operatorname{sen}^{-1} \left[ \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a) \cdot s + (1-a) \cdot m_b \cdot \sigma'_{3n}] \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a) \sqrt{1 + \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a)}}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$\phi'$  : Ángulo de fricción, en °.

$c'$  : Fuerza de cohesión, en MPa.

$m_b$  : Valor reducido (para macizos rocosos) de la constante  $m_i$  (para la roca intacta).

$s, a$  : Constantes en función de las características del macizo rocoso.

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

$\sigma'_{3n}$  : Constante adimensional.

El valor de  $\sigma'_{3n}$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$\sigma'_{3n}$  : Constante adimensional

$\sigma'_{3\max}$  : Esfuerzo de confinamiento máximo, en MPa.

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

Por consiguiente, según Hoek et al. (2002), para túneles, el valor del esfuerzo de confinamiento máximo ( $\sigma'_{3\max}$ ) se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_{3\max} = 0.47 \cdot \sigma'_{cm} \cdot \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma \cdot H} \right)^{-0.94} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

$\sigma'_{3\max}$  : Esfuerzo de confinamiento máximo, en MPa.

$\sigma'_{cm}$  : Resistencia global del macizo rocoso, en MPa.

$\gamma$  : Peso unitario del macizo rocoso, en MN/m<sup>3</sup>

H : Profundidad del túnel con respecto a la superficie, en m.

Para obtener la resistencia global del macizo rocoso ( $\sigma'_{cm}$ ), se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \left[ \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \cdot \left( \frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a) \cdot (2+a)} \right] \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$\sigma'_{cm}$  : Resistencia global del macizo rocoso, en MPa

$\sigma_{ci}$  : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, en MPa.

$m_b$  : Valor reducido (para macizos rocosos) de la constante  $m_i$  (para la roca intacta).

s, a : Constantes adimensionales en función de las características del macizo rocoso.

## 2.2.5 Método de los Elementos Finitos

El método de elementos finitos, para el análisis tenso-deformacional de túneles, es una técnica de análisis numérico utilizada para resolver problemas asociados al comportamiento del macizo rocoso, los cuales están regidos por ecuaciones diferenciales. Este método transforma dichas ecuaciones diferenciales en un sistema algebraico aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución (Rodríguez, 2018).

Su procedimiento se basa en la discretización, es decir, en dividir el macizo rocoso que rodea al túnel en pequeñas regiones geométricas simples llamadas

elementos finitos, donde se representan las propiedades del material y las condiciones de esfuerzo. Las variables desconocidas, como los desplazamientos o tensiones, se calculan en los nodos de estos elementos, permitiendo obtener una aproximación precisa del comportamiento mecánico del túnel frente a diferentes condiciones de carga. Evaluando de esta manera su estabilidad, determinando puntos críticos y decisiones de diseño, como la modificación de geometrías del túnel en las zonas de mayor esfuerzo para prevenir fallos (Oviedo, 2019).

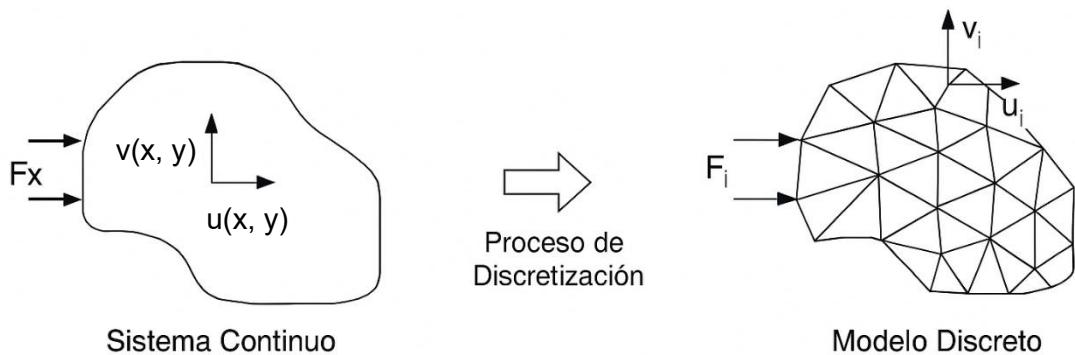


Figura 5. Proceso de Discretización por el Método de Elementos Finitos  
Fuente: Rodríguez, 2018.

## 2.2.6 Software Phase2

Se trata de un programa en 2D de elementos finitos elasto-plástico para el cálculo de los desplazamientos y tensiones alrededor de las aperturas subterráneas. Dicho programa, permite el empleo de los modelos de Mohr-Coulomb o del modelo de Hoek-Brown así como el desarrollo de análisis tenso-deformacional (Ingeoexpert, 2025).

El software Phase2 se estructura en tres módulos: Model, Compute e Interpret. El módulo “Model” corresponde a la etapa de pre-proceso, en la cual se definen y modifican los parámetros del modelo, en este se ingresan los límites, el tipo de soporte, esfuerzos in situ, las propiedades del macizo rocoso y se genera la malla de elementos finitos, entre otros aspectos necesarios para la simulación. El módulo “Compute” es el encargado de ejecutar los cálculos asociados al método de elementos finitos, procesando toda la información previamente definida en la fase de modelado. Finalmente, el módulo “Interpret”, es en el cual se pueden

interpretar parámetros como: esfuerzos principales, desplazamientos, factores de seguridad, entre otros (Rodríguez, 2018).

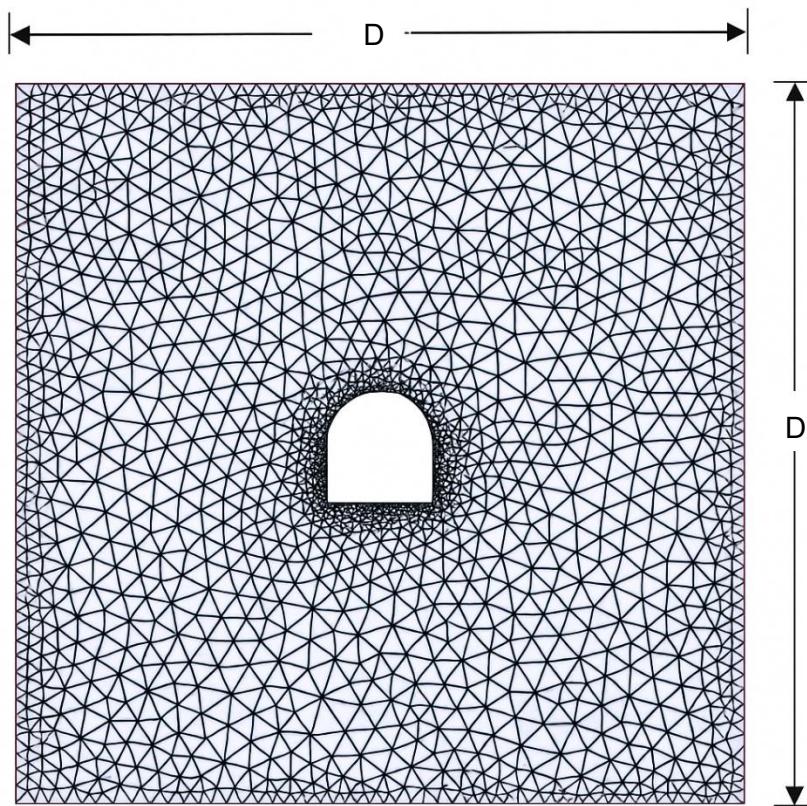


Figura 6. Malla de Elementos Finitos de Dimensión  $D \times D$  desarrollado en Software Phase2  
Fuente: Jamchiki, et al., 2023.

### 2.2.7 Sostenimiento en Túneles

Según Osinergmin (2017), el sostenimiento en túneles tiene como propósito garantizar, controlar y conservar la estabilidad de las mismas, con el objetivo de ofrecer condiciones seguras de trabajo y permitir el acceso a las labores subterráneas. Existen dos categorías de sostenimiento: activos, en los cuales los elementos de sostenimiento pasan a formar parte integral de la roca, y pasivos, donde los elementos de sostenimiento se colocan de manera externa a la roca. Entre los métodos de sostenimiento se encuentran: cuadros de madera, cimbras metálicas, puentes, pernos de anclaje, pernos con resina, barras helicoidales, sistemas Swellex, Split set, mallas (electrosoldadas o eslabonadas) y el shotcrete. La selección del sostenimiento más adecuado depende de la caracterización

geomecánica del macizo rocoso, de las exigencias de servicio de la excavación, del equipo de construcción disponible y de los costos asociados a su instalación.

- **Sostenimiento con Cuadros de Madera**

Se emplean en el sostenimiento de túneles excavados en macizos rocosos de muy mala calidad, es decir, altamente fracturados, alterados y que requieren un soporte inmediato. Están conformados por tres elementos principales: dos postes laterales y un travesaño superior, además de dos tirantes que unen los cuadros. Estos cuadros de madera están diseñados para resistir las cargas verticales generadas por el peso propio de la roca ubicada en el techo del túnel (Osinergmin, 2017).

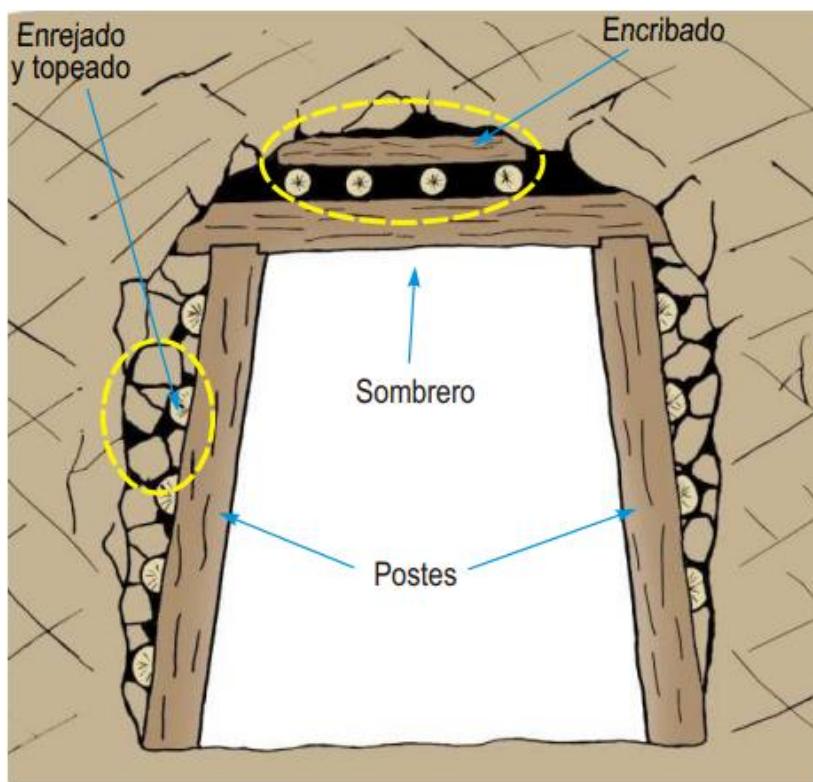


Figura 7. Elementos de un Cuadro Cónico.  
Fuente: Cruz, 2004.

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

*Análisis Dinámico:* Interpretación de la relación entre las deformaciones y los esfuerzos causantes. Intenta definir las fuerzas responsables de los procesos de deformación (Davis, 1984).

*Convergencia-Confinamiento:* Análisis de interacción entre: Roca y sostenimiento (usado para el modelo de elementos finitos), se obtiene las cargas que el terreno transmite al sostenimiento como resultado de excavación del túnel y la instalación del sostenimiento. (Gullón, 2011).

*Clasificación Geomecánica:* Descripción sistemática de la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de naturaleza subjetiva y objetiva, expresado en cantidades, denominado índice de clasificación (Berrocal, 2015).

*Discontinuidades:* Se refieren a cualquier plano de separación dentro del macizo rocoso, que puede originarse de procesos sedimentarios, como las superficies de estratificación o laminación, diagenéticos o tectónicos, como las diaclasas o fallas (González, 2002).

*Labor de Preparación:* Trabajos realizados en mina, previos, para su extracción, mediante la construcción de socavones, guías, sobreguías, tambores, pozos verticales, inclinados, cruzadas, vías de transporte o mediante remoción del estéril de cobertura y minería parcial (Guerra, 2003).

*Modelo Geológico:* Consiste en la recopilación de información geológica existente sobre la zona de estudio, para proporcionar información más detallada, necesaria para el diseño de la mina (Ramírez et al., 2008).

*Modelo Matemático:* Simula el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y de los elementos estructurales presentes en el entorno de la excavación (Ramírez et al., 2008).

*Precipitación Pluvial:* Caídas de agua de la atmósfera por el cambio de temperatura, en forma de lluvia, nieve o granizo. (Dávila, 2011).

*Sostenimiento:* Término usado para describir los materiales y procedimientos utilizados para mejorar la estabilidad y mantener la capacidad portante de la roca en los bordes de una excavación subterránea (Lopez, 2011).

*Tensión:* Esfuerzo aplicado por unidad de área sobre un cuerpo, provocando su deformación. Consiste en dos o más esfuerzos que actúan en direcciones contrarias (Dávila, 2011).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN

El túnel de exploración está emplazado en roca arenisca sedimentaria perteneciente a la Mina San Sebastián ubicada en el centro poblado Tres Cruces, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba y departamento de Cajamarca. Geográficamente, la operación minera de la Mina San Sebastián superpone a las labores metálicas pertenecientes a la concesión Acumulación Shahuindo; ubicándose en el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca; cuya base gráfica se encuentra en el sistema UTM - DATUM - WGS84 - ZONA - 17, ubicado en el cuadrángulo de Cajabamba (*Ver Anexo C. Plano N° 01: Imagen Satelital. Plano N° 02: Ubicación*).

Tabla 9. Coordenadas de la Bocamina de Mina San Sebastián.

Mina	Este (m.)	Norte (m.)	Cota (msnm.)
San Sebastián	805962.000	9156434.000	3376.000

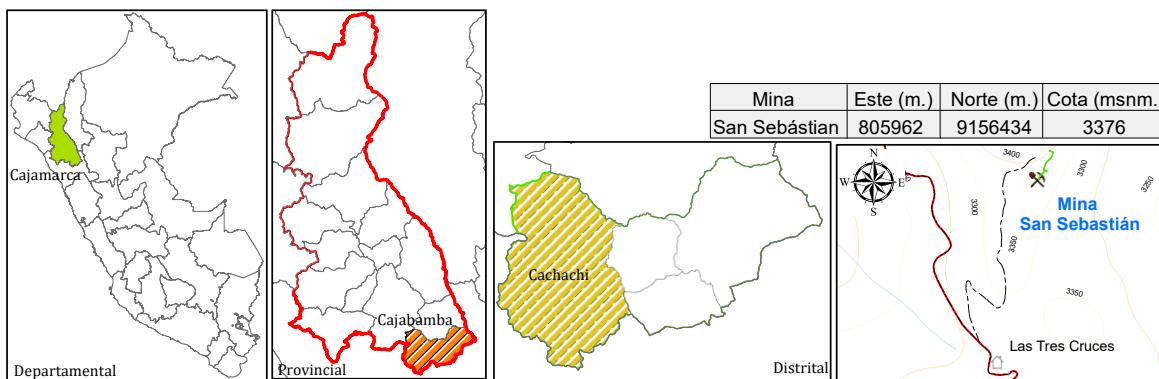


Figura 8. Ubicación Política del Túnel de la Mina San Sebastián.

### 3.2 ACCESIBILIDAD

El primer tramo conformado por vía asfaltada, se inició desde la ciudad de Cajamarca con rumbo SE a E llegando a Namora, luego con orientación SE llegando a Ichocán, posteriormente cambiando a orientación S llegando a Aguas Calientes y finalmente con orientación SW a SE se llegó a Pomabamba. El segundo tramo conformado por carretera afirmada, con orientación SW se llegó a Moyan Alto, luego con orientación NW llegando a Cholque y finalmente pasando a orientación SW se llegó al centro poblado Tres Cruces. Posteriormente, el recorrido continuó por un tercer tramo compuesto por una trocha carrozable con orientación NW a SE, que condujo hasta el extremo final de dicha trocha. Finalmente, se accedió a un cuarto tramo, conformado por un camino de herradura con orientación SW a NE, llegando a la bocamina de la Mina San Sebastián.

Tabla 10. Ruta de Accesibilidad con Movilidad al Área de Investigación – Mina San Sebastián.

Tramo			Recorrido			
De	A	Estado de vía	Vía	Transporte	Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Cajamarca	Aguas calientes	Buena	Terrestre	Combi	88+550	02:12
Aguas calientes	Pomabamba	Buena	Terrestre	Combi	17+700	00:21
Pomabamba	Tres Cruces	Regular	Terrestre	Combi	18+900	00:43
Tres Cruces	Fin de trocha	Mala	Terrestre	Mototaxi	00+850	00:03
Total					126+000	03:19

Tabla 11. Ruta de Accesibilidad mediante Caminata – Mina San Sebastián.

Tramo			Recorrido			
De	A	Estado de vía	Vía	Transporte	Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Fin de trocha	Camino real	Muy mala	Terrestre	Caminata	00+090	00:04
Camino real	Bocamina	Muy mala	Terrestre	Caminata	00+032	00:02
Total					00+112	00:06



Figura 9. Bocamina de Ingreso al Túnel Exploratorio de la Mina San Sebastián, ubicado en el Lado Frontal del Anticinal Algamarca.

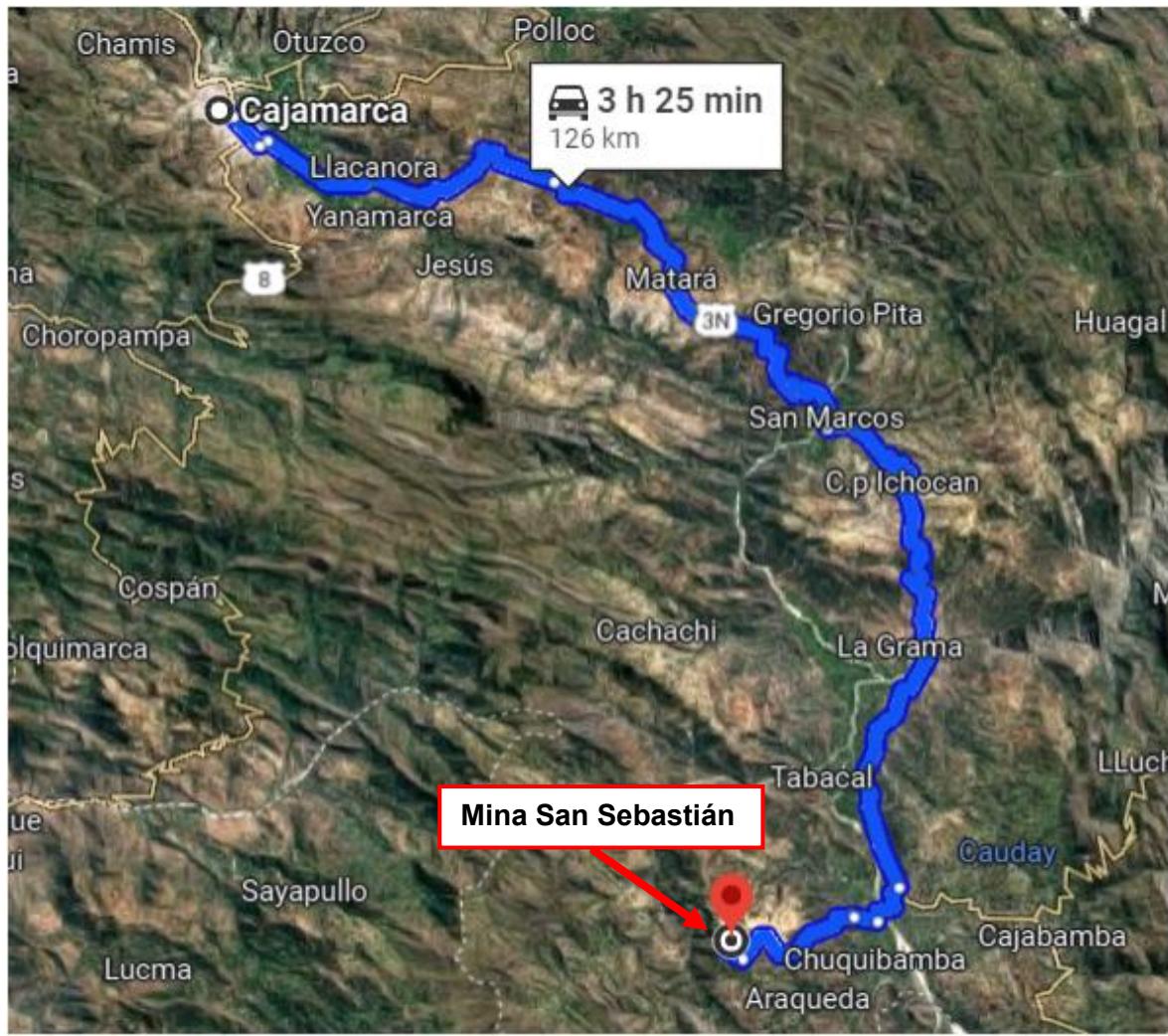


Figura 10. Ruta de Acceso de Cajamarca al Centro Poblado Tres Cruces (Mina San Sebastián).

Fuente: Google Maps, 2025.

### 3.3 CLIMA Y METEOROLOGÍA

Las actividades mineras se encuentran afectadas por cambios de temperatura y precipitación durante el año, relacionados con veranos: frescos y nublados, e inviernos cortos siendo: fríos, secos y parcialmente nublados, mostrando variaciones de temperaturas desde 4°C a 20°C. Siendo el clima caluroso de 6°C a 17°C desde Enero a Febrero y de 6°C a 16°C desde Noviembre a Diciembre; clima fresco de 5°C a 14°C en el mes Junio y de 4°C a 14°C en el mes de Agosto; presentando nubosidades de cielo: despejado desde Mayo a Septiembre durando 4.80 meses, y nublado desde Enero a Mayo y de Septiembre a Diciembre, durando 7.2 meses (SENAMHI, 2024)

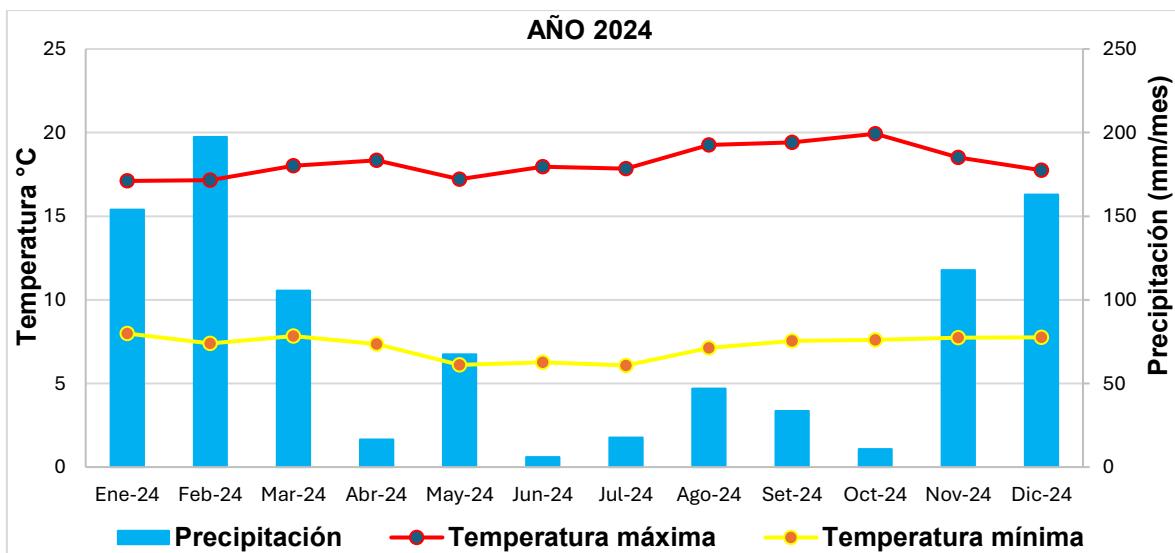


Figura 11. Reporte Meteorológico por Interpolación de Valores mediante: Temperatura °C y Precipitación, de la Estación Cachachi.

Fuente: SENAMHI, 2024.

La información mostrada fue descarga de la base Senamhi, observando así los cambios meteorológicos de la estación: Cachachi, tipo: PE – meteorológica, con código: 107068, perteneciente al distrito Cachachi, provincia Cajabamba y departamento Cajamarca; con una latitud de 7°27'3.83'', longitud de 78°16'6.78'' y altitud de 3,228 msnm.; siendo posteriormente reutilizada para obtener resultados que servirán para los cálculos hidrológicos, sirviendo de base para la hidrología.

### 3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Parte fundamental en la realización de la tesis dada mediante secuencias y metodologías, que fueron aplicadas para la realización de la evaluación geomecánica de la Mina San Sebastián. Así mismo se siguió patrones enfocados a la minería por ser de carácter ingenieril de estabilización de macizos rocosos de la calidad de roca; planteando para el desarrollo de tesis las siguientes variables: Litología, infiltración, sismicidad, tensión gravitatorio e inestabilidad; plasmando metodología: cuantitativa, transversal diseño no experimental y método deductivo e inductivo.

### **3.4.1 Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación**

*Investigación cuantitativa:* Basada en el desarrollo de información numérica, obtenida del cartografiado geomecánico y procesamiento de información; relacionada con los modelos: geológico, geomecánico y matemático; siendo base fundamental para mostrar la calidad de información real del túnel; por consiguiente, se lograr contrarrestar la hipótesis mediante información de análisis: estadístico y modelo matemático, para describir, explicar y predecir fenómenos de ocurrencia en las instalaciones del túnel.

*Nivel transversal:* Se basa en observaciones del entorno de la sección del túnel, en un momento específico, relacionados con: litología, geoestructuras, infiltración, sismicidad, tensión gravitatoria e inestabilidad, que influyen en los cambios tensionales y redistribución tensional alrededor del túnel, originando inestabilidad geomecánica. Por consiguiente, se dará a conocer porque la ocurrencia de inestabilidades o desprendimiento de cuñas de roca y cambios de tensionales en cada sección geomecánica de la Mina San Sebastián.

*Diseño no experimental:* Fue aplicada en ver el comportamiento del túnel frente a cambios del macizo rocoso, debido a la apertura de nuevas secciones del túnel, inducidas de manera natural afectando el estado o medio elástico del macizo rocoso, siendo visualizados estos sucesos por: ingenieros, supervisores, capataz y trabajadores, por su constante ingreso y salida del túnel.

*Método deductivo – inductivo:* En el estudio se utilizó un enfoque mixto. Desde lo deductivo, se aplicaron los principios de la mecánica de rocas para analizar el macizo rocoso del túnel de la Mina San Sebastián y definir sus condiciones de calidad y estabilidad. Desde lo inductivo, se interpretaron los datos obtenidos en campo y los resultados de los análisis, identificando patrones de comportamiento del macizo rocoso y generando conclusiones prácticas sobre la estabilidad del túnel de la Mina San Sebastián y el tipo de sostenimiento requerido.

### **3.4.2 Población**

El túnel exploratorio de la Mina San Sebastián, con longitud de 120 m.

### **3.4.3 Muestra**

Está conformada por cuatro estaciones: EG-01 (Pi + 00.00 m. - Pi + 12.15 m.), EG-02 (Pi + 21.55 m. - Pi + 31.55 m.), EG-03 (Pi + 57.85 m. - Pi + 67.85 m.) y EG-04 (Pi + 91.70 m. - Pi + 101.70 m.)

### **3.4.4 Unidad de Análisis**

Las unidades de análisis están relacionadas con las variables que están afectando al macizo rocoso, planteando como variables: litología, hidrogeología, geoestructuras y tensiones.

### **3.4.5 Tipo e Instrumentos de Información**

Se basa en técnicas o metodologías que cada investigador toma en consideración para mejor recopilación de información y procesamiento, teniendo como base información de ocurrencias visuales, auditivas y profesionales del túnel de la Mina San Sebastián. Así mismo con la tesis se busca proporcionar información del entorno de la roca y su comportamiento frente a aberturas subterráneas, logrando inestabilizarse con el paso del tiempo, fundamentadas mediante: procesamiento, análisis, interpretación y redacción; mediante el cartografiado progresivo de cada variable. Se definen las siguientes etapas:

- ***Primera Etapa: Recopilación de Información***

Basada en la búsqueda de material bibliográfico conformado por: papers, artículos científicos, seminarios, libros y tesis, relacionados con la Ingeniería de Rocas. Empleándose asimismo servidores como: Google Maps (ruta de acceso en tiempo real), Geocatmin (información geológica y climática, mediante el catastro minero -Ingemmet), SASPlanet (visualización y descarga de imágenes satelitales

de alta resolución), Global Mapper (genera y descarga, archivos shapefile, mostrando información cuantitativa y cualitativa del entorno a investigar) y ArcGis (base fundamental abastecida de los programas numéricos anteriores para plasmar planos o modelos que conforman la zona de estudio).

- ***Segunda Etapa: Campo***

Está relacionada con el cartografiado subterráneo, obtenido en las salidas de campo a la zona de investigación, siendo internamente planificadas de acuerdo con: distancia, área y toma de información de campo, siendo desarrollada la tesis por 7 salidas de campo debidamente planificadas de acuerdo con la recapitulación de información de cada variable dependiente e independiente, obteniendo información: cualitativa y cuantitativa, que posteriormente será evaluada y procesada en función del desarrollo del capítulo de la tesis.

- ***Tercera Etapa: Gabinete***

La información obtenida en la segunda etapa, es agrupada y seleccionada, mediante el contexto del desarrollo de la tesis. Así mismo en esta etapa se realiza el análisis e interpretación de datos y la redacción de la tesis, conteniendo los resultados obtenidos a partir de los datos de campo y el uso de los softwares RocData y Phase2.

- ***Cuarta etapa: Análisis e Interpretación de Resultados***

Los resultados que se obtuvieron son de vital importancia porque dan a demostrar la calidad de información, procesada y obtenida en cada acápite de la tesis, mostrada en: gráficos, tablas y planos; logrando contrastar la hipótesis planteada y determinando de esta manera el estado tensodeformacional y tipo de sostenimiento requerido para el túnel de la Mina San Sebastián.

### **3.4.6 Equipos, Materiales y Soporte Computacional**

*Equipos:* Sirven para realizar mediciones, lecturas y verificar las características físicas y estructurales del macizo rocoso. Su función principal es asegurar que la información geológica y geotécnica recogida sea precisa y confiable. Los equipos utilizados están conformados por: brújula Brunton, GPS navegador, peine de Barton, martillo Schmidt, lupa, picota, protactor rayador, wincha, flexómetro.

*Materiales:* Sirven como apoyo logístico y de registro, facilitando la toma de notas, almacenamiento de datos y la documentación fotográfica. Además, incluyen elementos de seguridad personal, cuya función es garantizar la protección de los investigadores. Los materiales utilizados están conformados por: registro geomecánico, portapapeles, ácido clorhídrico, plano topográfico, plano geológico, imagen satelital, libreta de campo, lapiceros, colores, casco, lámpara y cámara fotográfica.

*Softwares:* Sirven para el tratamiento y análisis de la información recolectada. Su función es convertir los datos de campo en conclusiones técnicas aplicables. Los programas utilizados son: SASPlanet V22, AutoCad 2023, Global Mapper 15, ArcGis 10.8, RocData V4 y Phase2 V8

## CAPÍTULO IV

### PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1.1 Geología Local

El túnel de la mina San Sebastián se encuentra emplazada en el Cretáceo Inferior del Grupo Goyllarisquizga, en el miembro superior de la Formación Chimú desde el Pi+12.15 m. a Pi+120.00 m. (Ver Anexo C. *Plano N° 03: Geológico*), constituida por secuencias de roca arenisca de color blanquecino conformado por estratos uniformes subverticales de geometría tabular de grosor: 0.30 m. a 0.45 m. de grano medio con orientación DD/D = 220°/48°SW, formando grietas de tracción ortogonales a la estratificación ocasionando sectores de desprendimiento de rocas de forma: Prismática y tetraédrica, con fractura de corte angulosa. Además, la operación minera se ubica en el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca conformando la caja: Piso y techo del túnel, con ligeras alteraciones en la superficie de la roca por estar expuestas a la humedad constante, formando patinas de oxidaciones de color: Amarillento, rojizo y anaranjado en algunos sectores del túnel.

Por consiguiente, se evidenció depósito reciente perteneciente al Holoceno desde el Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. constituyendo Depósito Coluvio-deluvial (Ver Anexo C. *Plano N° 03: Geológico*), de color: Castaño a anaranjado presentando fragmentos de roca angulosa por la acción de la gravedad de dimensiones: 0.25 m. a 0.30 m., con matriz englobante de material fino presentando estructura desordenada y poco compacta, granulométricamente el 90% de dicho material tiene un diámetro mayor a 3 pulgadas y el 10% restante tiene diámetro menor a 3 pulgadas (Grava: 0.00%, arena: 2.00% y finos: 8.00%), acumulándose como cono de Bolonería en la parte frontal del anticlinal, depositándose hasta la parte baja de la ladera.



Figura 12. Sección de Galería conformada por Depósito Coluvio-Deluvial con Fragmentos de Roca Angulosa de Diámetro Mayor a 3 pulgadas, con Estructura Desordenada poco Compacta, en Matriz Englobante de Finos.



Figura 13. Roca Arenisca de Color Blanquecino de la Formación Chimú ubicada en el Pi+80.50 m. constituyendo la Caja: Techo y Piso del Túnel de la Sección en Forma de Baúl.

#### 4.1.2 Hidrología

Las operaciones mineras se desarrollan en la cara frontal del anticlinal Algamarca a una distancia de 850 m. de la quebrada Choloque, siendo el efluente más cercano a la instalación minera metálica, no afectando el cauce del río principal. La quebrada Choloque inicia su naciente en el centro poblado Tauna a una altitud de 3,300 msnm. con dirección de flujo SW-NE y S-N, conformando una longitud de 5.20 km. evacuando las aguas a la quebrada Shahuindo en la cota 2,450 msnm.



Figura 14. Río Condebamba de Cauce Variable, con Dirección de Flujo de Orientación SE-NW y W-E.

La quebrada Shahuindo inicia su naciente a los 3,000 msnm. en el centro poblado José con orientación SW-NE y W-E, evacuando las aguas a la quebrada Higueron en la altitud 2,148 msnm. en el centro poblado Chingol, luego cambiando a orientación SW-NE con longitud 1.47 Km., evacuando las aguas al río Condebamba (Su naciente inicia en la provincia de Sánchez Carrión por la confluencia de los ríos: Río Grande y Sanagorán) en la cota 2,100 msnm. que tiene longitud de 29.75 Km. a la altitud 2,030 msnm., cambiando la orientación a SE-NW y W-E, confluyendo con el río Cajamarquino a altitud 1980 msnm. y formando el río

Crisnejas, presentando orientación W-E y SW-NE bruscamente, con longitud de 38.30 km. constituyendo el límite natural entre las provincias de Cajabamba y San Marcos, desembocando sus aguas al río Marañón que nace en el SW del departamento de Huánuco en la Provincia de Lauricocha a los 1,050 msnm. con orientación SSE-NNW, recorriendo aproximadamente 253.28 Km. interceptando con el río Chinchipe a los 390 msnm. con orientación NE-SW, siendo el principal afluente del río Amazonas, desembocando en el Océano Atlántico.



Figura 15. Visualización de la Quebrada Cholque con Orientación SW-NE, ubicándose a Distancia 850 m.

Así mismo se usó la base gráfica del Senamhi de la estación meteorológica de la estación: Cachachi, de código: 107068, perteneciente al distrito Cachachi, provincia Cajabamba, departamento Cajamarca; latitud:  $7^{\circ}27'3.83''$ , longitud:  $78^{\circ}16'6.78''$  y 3,228 msnm.

Tabla 12. Precipitación Máxima desde el Año: 2019 al 2024, mediante la Estación Cachachi.

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2019	46.50	193.00	269.80	80.30	32.60	1.80	7.50	0.00	23.00	147.10	107.40	191.40
2020	74.70	64.40	157.30	47.80	36.70	23.60	54.30	4.00	11.50	42.80	64.70	269.40
2021	165.00	64.90	241.80	131.40	76.80	25.90	3.90	27.20	25.30	184.30	191.80	147.40
2022	80.00	154.00	197.40	105.60	16.50	67.40	6.00	17.60	47.00	33.60	10.80	117.70
2023	162.90	131.20	222.60	69.30	87.10	2.00	0.80	2.80	7.90	114.20	130.40	259.80
2024	114.60	152.80	145.30	95.20	36.40	22.30	2.00	11.30	11.70	31.10	80.40	150.30

Fuente: SENAMHI, 2019 a 2024.

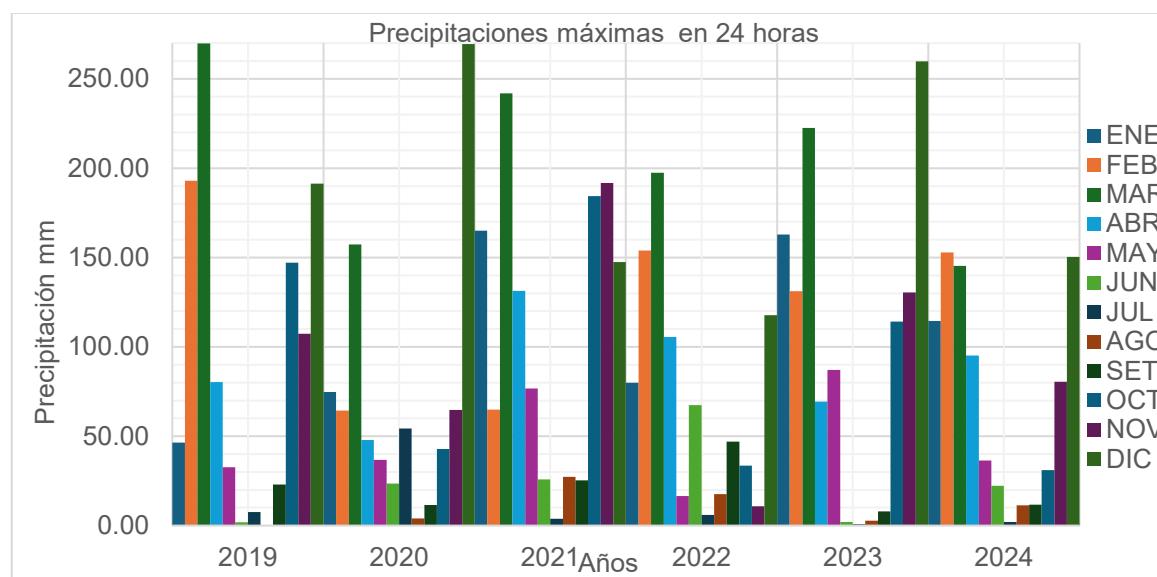


Figura 16. Variograma de Barras de la Precipitación Máxima en 24 horas - Estación de Cachachi.

Fuente: SENAMHI, 2019 a 2024.

#### 4.1.3 Hidrogeología Local

El túnel de la mina San Sebastián se encuentra emplazado en el flanco izquierdo del Anticlinal Algamarca, con excavación contra el buzamiento desfavorable, relacionándose con el manteo de estratos con dirección de flujo del agua subterránea hacia el SW, así mismo en el eje del túnel principal emana agua subterránea o nivel freático en las partes de la galería como: Hastial ( $Pi+72.90\text{ m. }Q = 0.15\text{ Lt/s}$ ,  $Pi+60.70\text{ m. }Q = 0.21\text{ Lt/s}$  y  $Pi+100.88\text{ m. }Q = 0.10\text{ Lt/s}$ ) y clave ( $Pi+112.03\text{ m. }Q = 2.15\text{ Lt/s}$  y  $Pi+116.50\text{ m. }Q = 2.45\text{ Lt/s}$ ); confluyendo un caudal total =  $6.43\text{ Lt/s}$ , así mismo aparece agua entre las fracturas de la roca desde aperturas: 2 mm. a 1.50 cm., relacionando con la permeabilidad secundaria -  $K_s$ . Por consiguiente, el túnel está conformado por roca arenisca de Formación Chimú categorizándolo como acuitardo sedimentario, afectando progresivamente al macizo rocoso ocasionando inestabilidades con el paso del tiempo en las secciones del túnel, así mismo para evacuar esta agua se ha construido cunetas de sección rectangular:  $0.30\text{m.} \times 0.20\text{ m.}$  desde la progresiva:  $Pi+00.00\text{ m.}$  a  $Pi+68.50\text{ m.}$ .



Figura 17. Acuífero de Agua Subterránea filtra en la Clave ubicado en el  $Pi+116.50\text{ m.}$ , en una Apertura de Junta 1.50 cm. a 2.50 cm. con  $Q = 2.45\text{ Lt/s}$ , manteniendo Flujo Constante de Agua en forma de Chorro.

Por consiguiente, el Depósito Coluvio-deluvial se relaciona con el acuífero poroso no consolidado, el cual genera humedad constante alrededor de la sección del túnel, siendo necesario la utilización de sostenimiento subterráneo desde: Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. (Ver Anexo C. Plano N° 07: Sostenimiento). Así mismo, la presencia de agua afecta constantemente los avances operacionales del túnel, siendo conducidos por cunetas para evitar la afectación de los equipos, teniendo en cuenta un nivel de rasante plasmada por topografía a escala 5/1,000.



Figura 18. Filtraciones de Agua en la Clave y Hastiales en el Pic+4.38 m.; formándose, por la Constante Humedad, Zonas Blanquecinas de Mineral Hidrocincita de Espesor 5 mm.

#### 4.1.4 Geología Estructural

Las geoestructuras del área de investigación están clasificadas en estructuras: Mayores y menores, de acuerdo con las características de formación de las rocas sedimentarias y volcánicas. Las estructuras mayores están dadas por el plegamiento del anticlinal Algamarca, formándose el eje de la cima del cerro Algamarca siendo fallado por dos fallas regionales: La Cruz y Santo Cristo-1, de orientación Az/Bz = N55°/75°SE cortando transversalmente al anticlinal y al mismo tiempo siendo aprovechado por el emplazamiento de minerales como: Cu, Ag y Au.



Figura 19. Cuña Tetraédrica ubicada en la Clave del Túnel, delimitada por Tres Familias de Juntas, en el Pi+80.25 m.

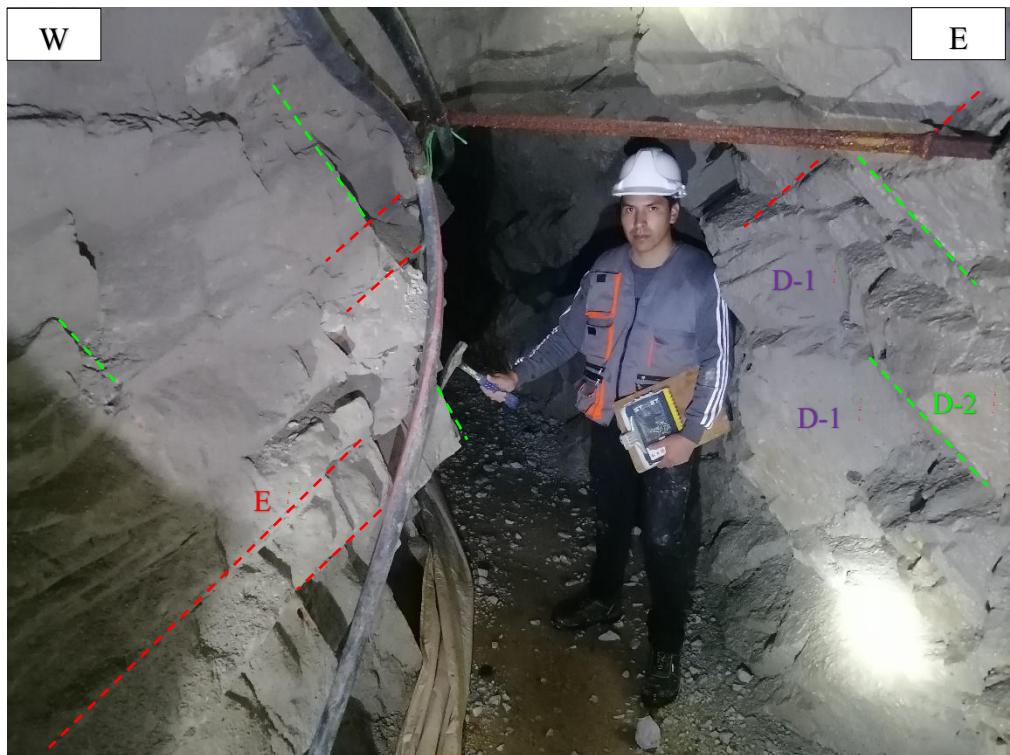


Figura 20. Delimitación de Tres Familias de Discontinuidades, en el Macizo Rocoso de la Formación Chimú, formando Formas Geométricas de acuerdo con la Proyección de sus Caras Libres.

Por consiguiente se evidencian geoestructuras menores que están influenciadas con el grado de fracturamiento del macizo rocoso, conformadas por tres familias Az/Bz: N130°/48°SW, N280°/58°NE y 350°/54°NE, ocasionando desprendimiento de rocas de: Hastiales y clave, conformado por rocas de calidad: Regular a buena, de dimensiones 0.25 m. a 0.45 m. formando cuñas geométricas limitadas por los planos de cizallamiento: Tetraédrica, prisma truncados, prisma doblemente truncados, etc. que afectan constantemente la inestabilidad del túnel (*Ver Figura 18 y Figura 19*).

#### 4.1.5 Sismicidad

En el túnel de la mina San Sebastián se generan vibraciones constantes a causa de la actividad minera (perforación, voladura, etc), produciendo aceleraciones sísmicas horizontales (Sh) y verticales (Sv) que afectan la estabilidad del macizo rocoso del túnel. Estas vibraciones provocan redistribución tensional en los medios elástico, plástico y elastoplástico del macizo rocoso, generando microfracturas progresivas. Con la aplicación de la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” y considerando las propiedades elásticas de cada estación geomecánica, se determinaron los siguientes valores sísmicos representativos:

Tabla 13. Parámetros Sismorresistentes del Túnel de la Mina San Sebastián

Zonificación sísmica	Estación geomecánica			
	EG-01	EG-02	EG-03	EG-04
Zona Sísmica	Zona 3			
Factor de zona	0.35			
Tipo de perfil de suelo	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>
Factor de suelo (S)	1.00	0.80	0.80	0.80
Periodo T <sub>P</sub> (s)	0.40	0.30	0.30	0.30
Periodo T <sub>L</sub> (s)	2.50	3.00	3.00	3.00
Aceleración espectral Sh (m/s <sup>2</sup> )	0.158	0.168	0.135	0.131
Aceleración espectral Sv (m/s <sup>2</sup> )	0.423	0.387	0.361	0.319

#### 4.1.6 Geomecánica

El Túnel de la mina San Sebastián está conformada por rocas de calidad: Mala, regular a buena, debido a cambios litológicos, mejorando la calidad de roca conforme vamos profundizando y cortando horizontalmente a la Formación Chimú, con  $\sigma_{ci}$  de 58 MPa a 121 MPa y grado de fracturamiento bajo a medio, presentando oxidaciones de gran incidencia desde: Pi +00.00 m. a Pi + 15.20 m.; así mismo se encuentra afectado por agua subterránea que drena de los hastiales y clave del túnel, generando mayores incertidumbres en la estabilidad del macizo rocoso conforme pasa el tiempo de autosostenimiento del túnel.

Por consiguiente, el túnel principal tiene dirección de avance contra el buzamiento del túnel, cuantificándose como de calidad media por la orientación de la junta principal – estratificación.

Tabla 14. Caracterización Geomecánica del Macizo Rocoso del Túnel de la Mina San Sebastián.

Clasificación empírica		Estación geomecánica			
		EG-01	EG-02	EG-03	EG-04
<b><math>\sigma_{ci}</math> (MPa)</b>		58	115	108	121
<b>RQD (%)</b>	Cuantitativo	30.08	55.78	68.68	80.88
	Calidad	Mala	Regular	Regular	Buena
	Cuantitativo	28	49	57	72
	Calidad	Mala	Regular	Regular	Buena
	Categoría	IV-B	III-B	III-A	II-A
<b>RMR</b>	Bieniawski	Mala	Media	Media	Buena
	Romana	Mala a muy mala	Media a mala	Media a buena	Buena a muy buena
<b>GSI</b>	Cuantitativo	23	44	52	67
	Cualitativo	Mala	Regular	Regular	Buena
<b>Q</b>	Cuantitativo	0.85	6.27	7.19	15.64
	Cualitativo	Mala	Regular	Regular	Buena

Así mismo, se ha utilizado el software RocData mediante el criterio de resistencia generalizado de Hoek-Brown, siendo abastecido dicho software con información sobre: la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ), la caracterización geomecánica del macizo rocoso (GSI), el factor de perturbación

para el macizo rocoso (D), el factor de rotura para roca intacta ( $m_i$ ) y el módulo de deformación para roca intacta ( $E_i$ ) la cual se obtuvo a partir de la multiplicación de la relación de módulos (MR, que depende del tipo y textura de la roca) con la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ) .

De acuerdo con las características de la roca sedimentaria de la Formación Chimú de textura media con  $m_i = 17 \pm 4$  se asignó valores para el  $m_i$  desde: 10 a 17 que dependen de la caracterización geomecánica insitu; así mismo, como en el túnel de la Mina San Sebastián se realiza voladura no controlada, se asignó un factor de perturbación de  $D = 0.80$ ; y además se obtuvo los valores de los módulos de deformación para roca intacta que van desde 13,804 MPa. a 40,051 MPa.

Ingresada la base anterior al RocData, se reportó los valores de las constantes elásticas de macizo rocoso como:  $m_b$  (valor reducido del  $m_i$ ) variando desde: 0.153 a 3.077, la constante  $s$  desde: 0.00000857 a 0.0256 evidenciando que es roca alterada y fragmentada; y finalmente  $a \neq 1/2$  por estar constituidas de familias de juntas o diaclasas.

Tabla 15. Reporte de las Constantes Elásticas del Macizo Rocooso mediante el Software RocData - Mina San Sebastián.

Criterios	Estación geomecánica				
	EG-01	EG-02	EG-03	EG-04	
<b>Clasificación Hoek - Brown</b>	$m_i$	15	17	19	10
	$D$	0.80	0.80	0.80	0.00
	$E_i$ (MPa)	13,804	31,625	33,804	40,051
	$MR$	238	275	313	331
<b>Criterio Hoek - Brown</b>	$m_b$	0.153	0.606	1.158	3.077
	$s$	0.00000857	0.0002	0.0008	0.0256
	$a$	0.536	0.509	0.505	0.502
	$\sigma_t$ (MPa)	-0.003	-0.039	-0.075	-1.005
<b>Parámetros de masa rocosa</b>	$\sigma_c$ (MPa)	0.112	1.536	2.969	19.225
	$\sigma'_{cm}$ (MPa)	2.411	11.494	15.339	31.385
	$E_m$ (MPa)	371.26	2,012.60	3,737.44	26,991.61
	$c'$ (MPa)	0.035	0.178	0.351	2.542
<b>Criterio Mohr – Coulomb</b>	$\phi'$	48.32°	62.28°	61.90°	60.61°

Además, para mostrar los rangos de envolventes por fractura se plasmó peso específico de roca igual a 0.025 MN/m<sup>3</sup> y altura (H) variante de acuerdo con la afectación por columna de roca desde 6.75 m. a 18.80 m., siendo tensión de gravedad por su baja profundidad, mostrando valor promedio del  $\sigma'_3$ <sub>max</sub> desde 0.093 MPa. a 0.2842 MPa., también se obtuvo los parámetros de Mohr-Coulomb: c' desde 0.178 MPa. a 2.542 MPa. y  $\phi'$  desde 48.32° a 62.28°.

Aplicando las teorías de Sheorey fundamentadas en el campo tensional alrededor del túnel, ocasiona gran implicancia en la redistribución tensional por la cavidad generada de acuerdo a las secciones desde (H:V): 1.32 m.:2.05 m., 1.30m.:2.53 m., 1.10 m.:1.85 m. y 1.80m.:2.20 m., reportando valores de esfuerzo  $\sigma_1$  desde 0.169 MPa. a 0.470 MPa. y  $\sigma_3$  desde 0.093 MPa. a 0.2842 MPa.; plasmando valores de  $k < 1.00$  y  $\alpha > 45^\circ$ , sugiriendo sección de forma de herradura.

Tabla 16. Distribución de Esfuerzos Tensionales del Túnel de la Mina San Sebastián.

Campo tensional	Estación geomecánica			
	EG-01	EG-02	EG-03	EG-04
H (m.)	6.75	8.70	18.4	18.8
Qcarga (MPa)	-	-	0.2425	0.2525
$\sigma_1$ (MPa)	0.169	0.218	0.460	0.470
$\sigma_3$ (MPa)	0.0930	0.1297	0.2762	0.2842
k	0.550	0.595	0.600	0.605
$\alpha$	90°	90°	90°	90°
Forma sección	Baúl	Baúl	Baúl	Baúl

Por consiguiente, Phase2, plasmó el comportamiento tensodeformacional del túnel mostrando cambios en la calidad de estabilidad, mediante la interacción del medio: Plástico y elastoplástico, en función de: Sistema de discontinuidades, factor de seguridad y estado de plastificación. El sistema de discontinuidades muestra valores de afectación del estado: **Plástico** desde: 0.080 m. a 0.343 m. en el hastial, clave de 0.539 m. a 1.082 m. y piso de 0.475 m. a 0.801 m.; y **Elastoplástico** desde: 0.080 m. a 0.448 m. hastial, clave de 0.153 m. a 0.379 m. y piso de 0.120 m. a 0.281 m.; afectando transversalmente la estabilidad del túnel, en consecuencia, se desea mejorar la estabilidad mediante el desquinchado de roca de la excavación subterránea.

- **Estación Geomecánica 01**

Se ubica desde: Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m., con sección de túnel de: 1.40 m. x 2.05 m. en forma de baúl, a una profundidad de columna de roca de 6.75 m., constituido por Depósito Coluvio-Deluvial y rocas areniscas de color blanquecino de la Formación Chimú, con parámetros geomecánicos:  $\sigma_{ci} = 58$  MPa, ND = 36, L = 1.75 y  $\lambda = 20.57$ ; RQD = 30.08%, RMR = 28, GSI = 23 y Q = 0.85, categorizándolo como roca de mala calidad; y parámetros elásticos:  $\sigma'_{3\max} = 0.093$  MPa,  $k = 1.83$ ,  $\sigma_1 = 0.17$  MPa,  $\sigma_3 = 0.093$  MPa.

Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 58 MPa

GSI = 23 mi = 15 Factor de disturbancia = 0.80

Módulo intacto ( $E_i$ ) = 13,804 MPa

Modulus ratio (MR) = 238

Criterio Hoek – Brown

$m_b = 0.153$   $s = 0.00000857$   $a = 0.536$

Morh - Coulomb

Cohesión = 0.035 MPa Ángulo de fricción = 48.32°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.003 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 0.112 MPa

Resistencia global = 2.411 MPa

Módulo de deformación = 371.26 MPa

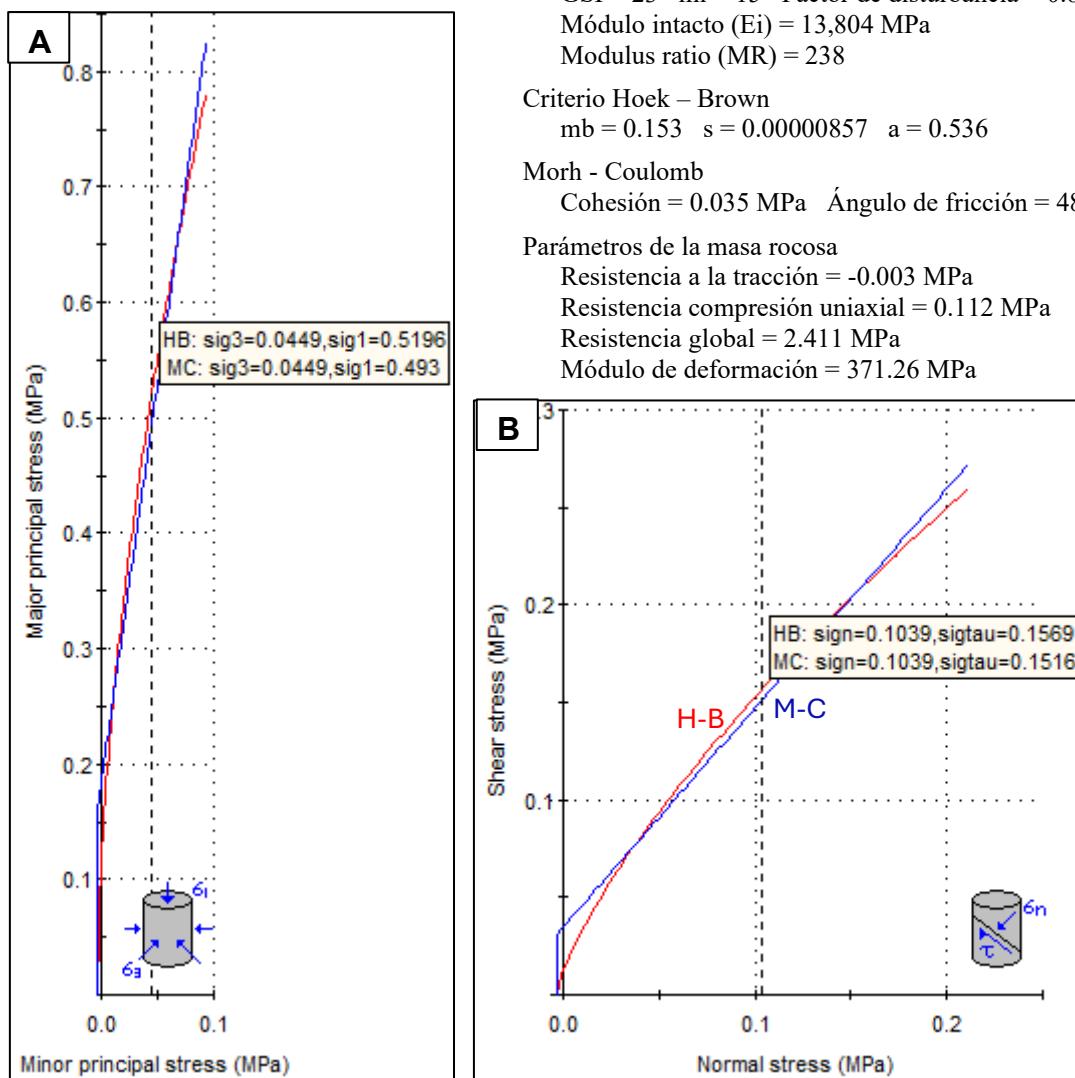


Figura 21. Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas, EG-01.

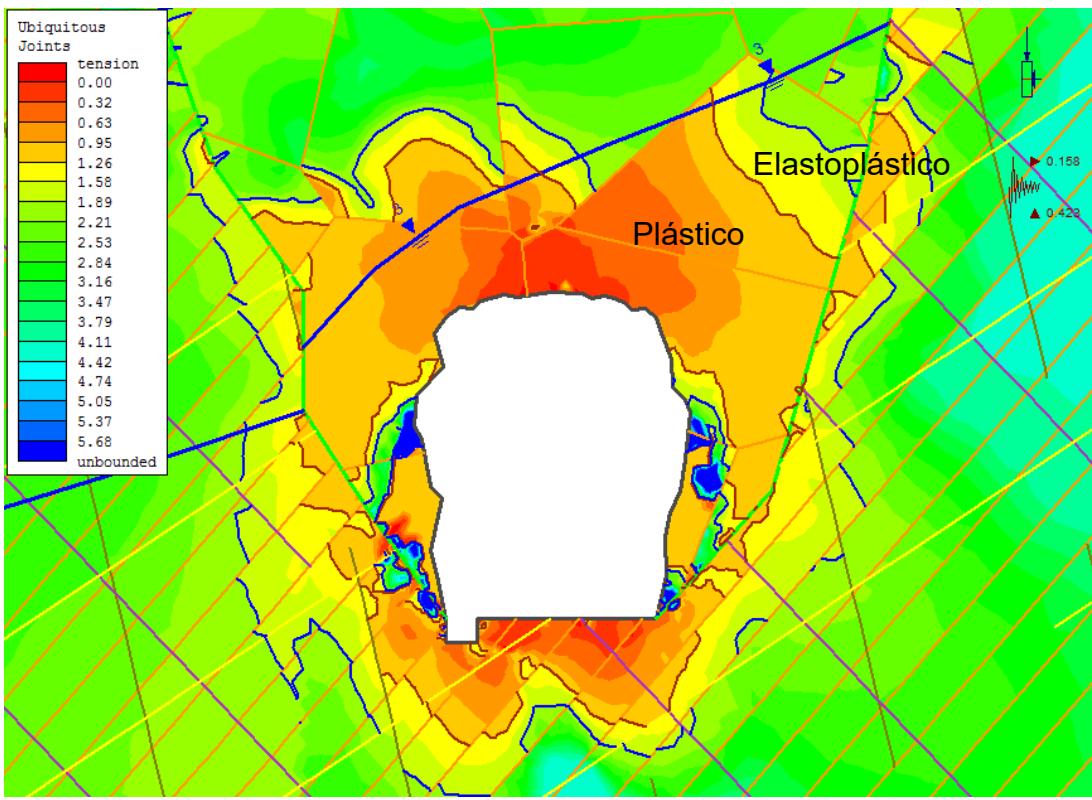


Figura 22. Comportamiento Tensodeformacional del Sistema de Diaclasas está concentrada en la Periferie del Túnel, formando Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.276 m. a 1.125 m.) y Elastoplástico (0.10 m. a 0.420 m.), EG-01.

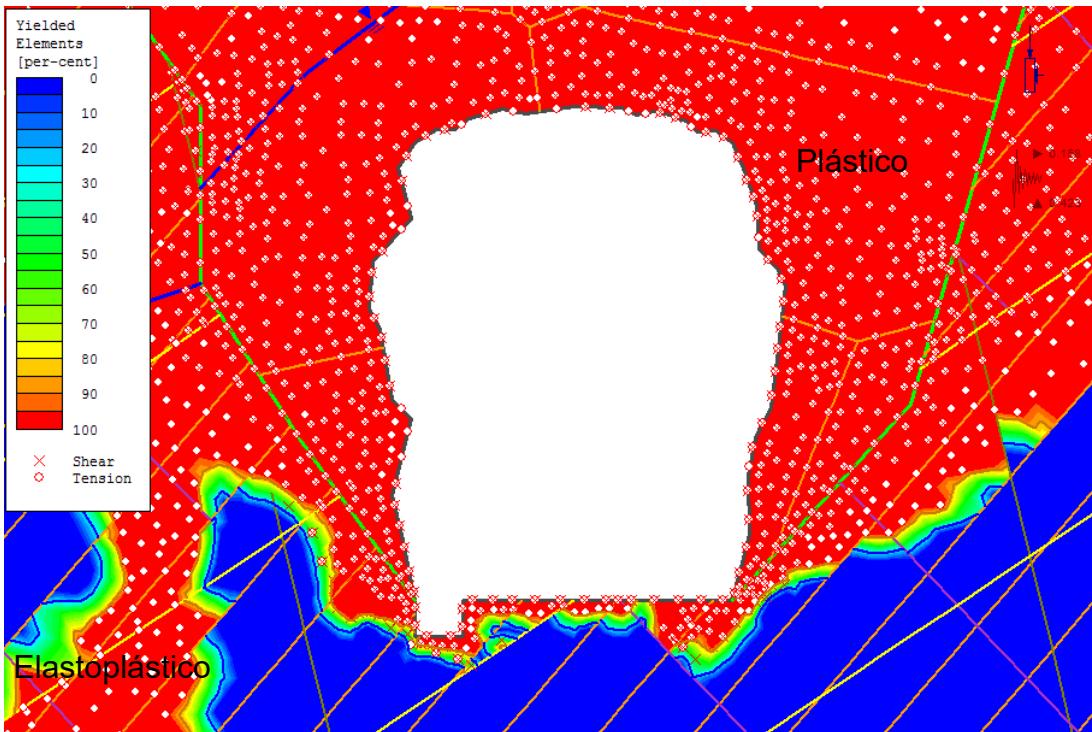


Figura 23. La Sección del Túnel en la EG-01, muestra Plastificaciones Constantes por Esfuerzos: Cortantes y Tensionales, afectando al Túnel progresivamente, por estar constituido por Depósito Coluvio-Deluvial, siendo necesario Sostenimiento.

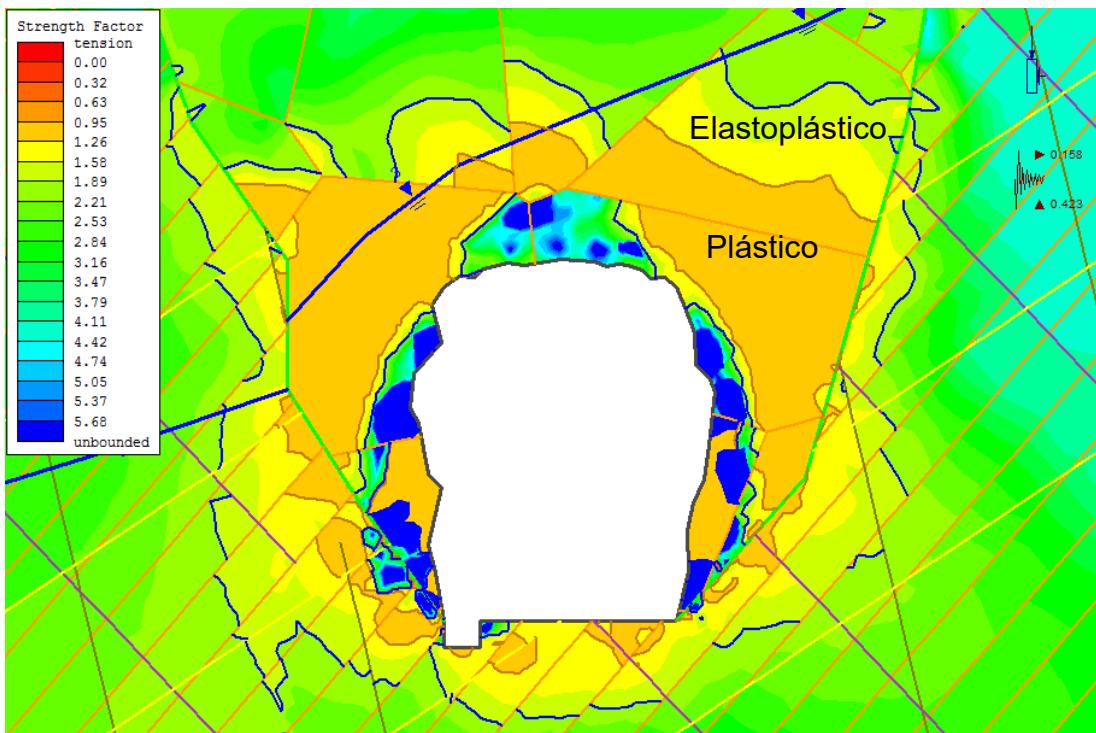


Figura 24. Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-01, formando Aureola Circular en el Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.214 m. a 0.610 m.) y Elastoplástico (0.231 m. a 0.408 m.).

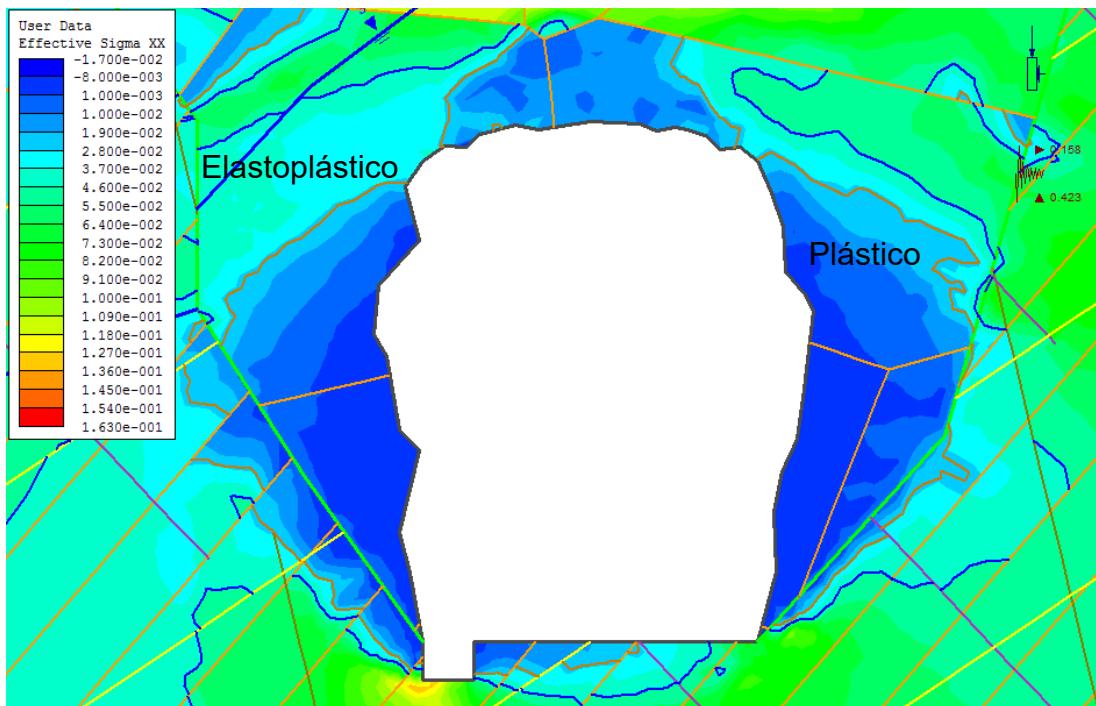


Figura 25. Variación del Campo Tensional mediante la Afectación de Agua Subterránea está ocasionando Instabilidades formando Elipse, siendo el Esfuerzo Horizontal de Mayor Magnitud afectando al Túnel en la EG-01.

- **Estación Geomecánica 02**

La caracterización geomecánica abarca desde: Pi+21.55 m. a Pi+31.55 m., constituido por areniscas de grano medio de color blanquecino de calidad media; de sección de túnel de: 1.30 m. x 1.95 m. en forma de baúl, a una profundidad de columna de roca de 8.70 m., con parámetros empíricos:  $\sigma_{ci} = 115$  MPa, ND = 42, L = 2.80 y  $\lambda = 15$ ; RQD = 55.78%, RMR = 49, GSI = 44 y Q = 6.27; y parámetros elásticos de roca:  $\sigma'_{3\max} = 0.1297$  MPa,  $k = 1.70$ ,  $\sigma_1 = 0.22$  MPa.

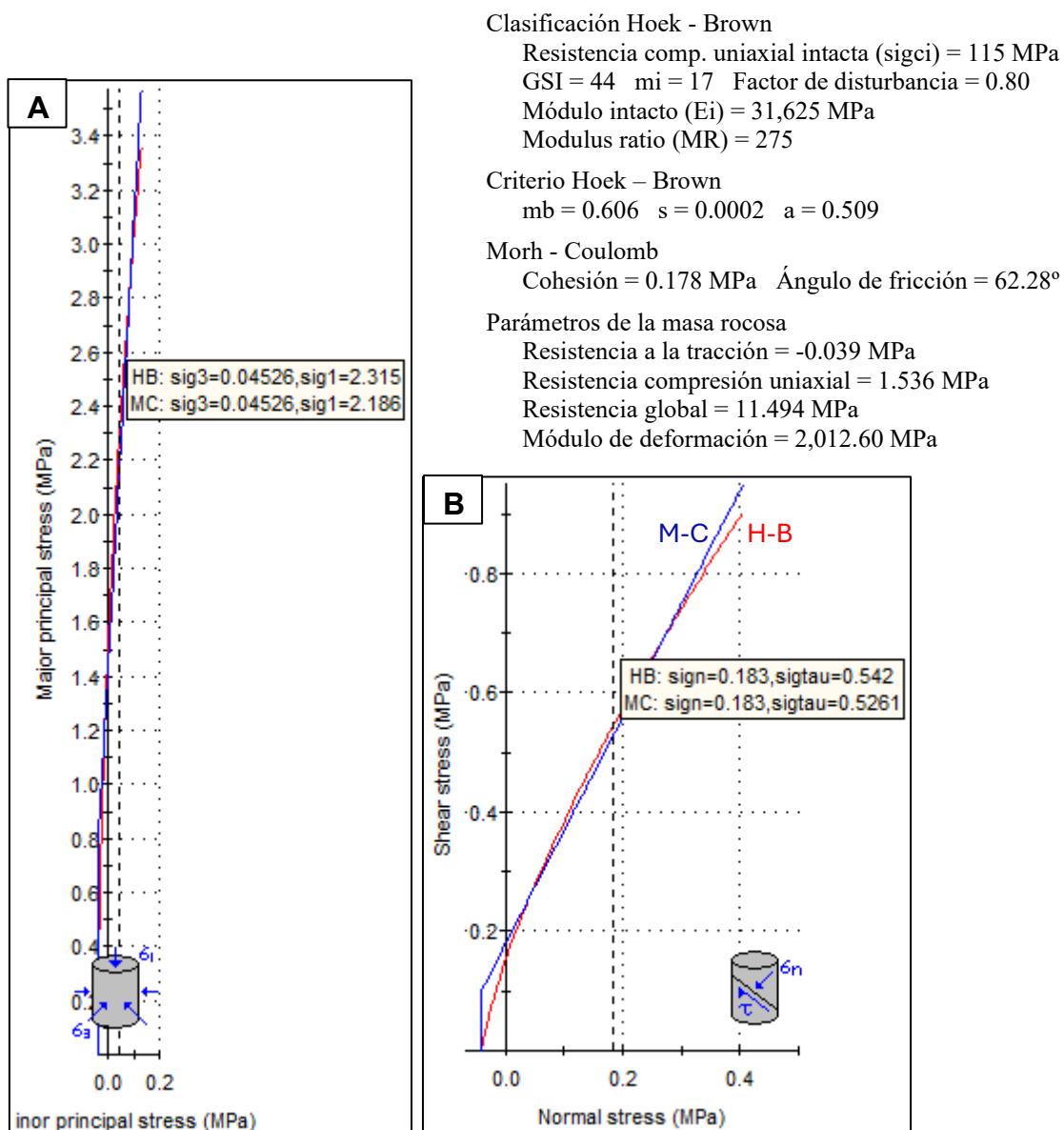


Figura 26. Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-02.

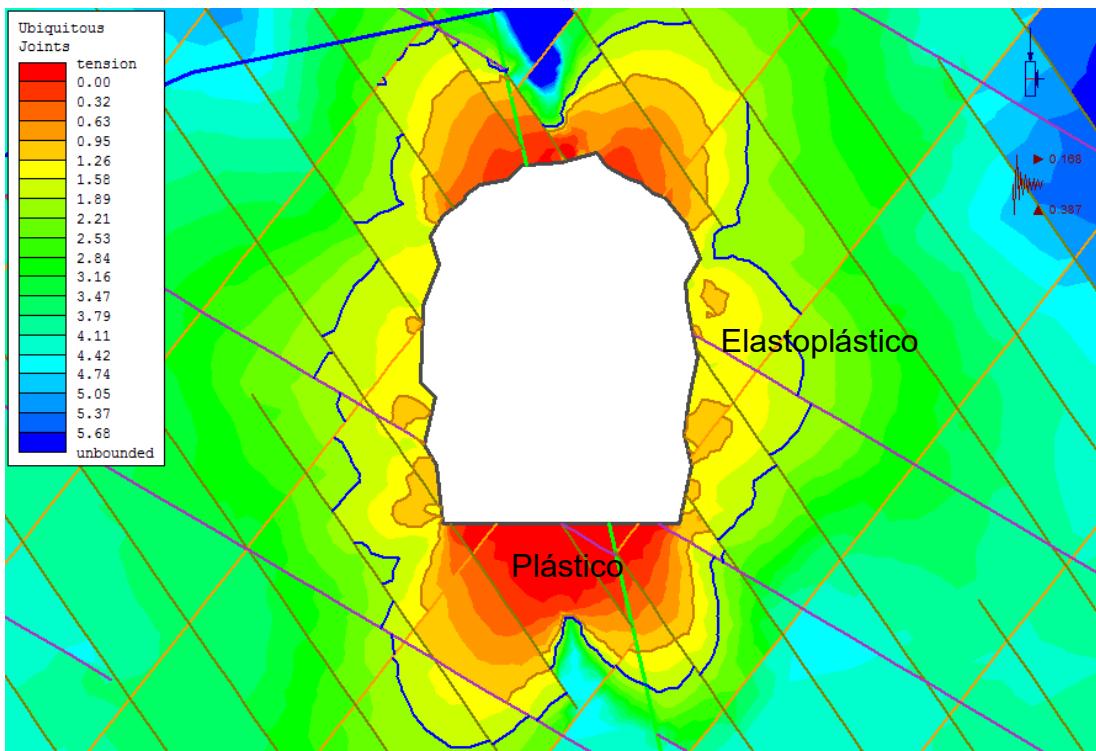


Figura 27. Sistema Diaclasas sometida al Campo Tensodeformacional de Forma Elíptica, en la Periferie del Túnel forma Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.256 m. a 0.617 m.) y Elastoplástico (0.201 m. a 0.360 m.), EG-02.

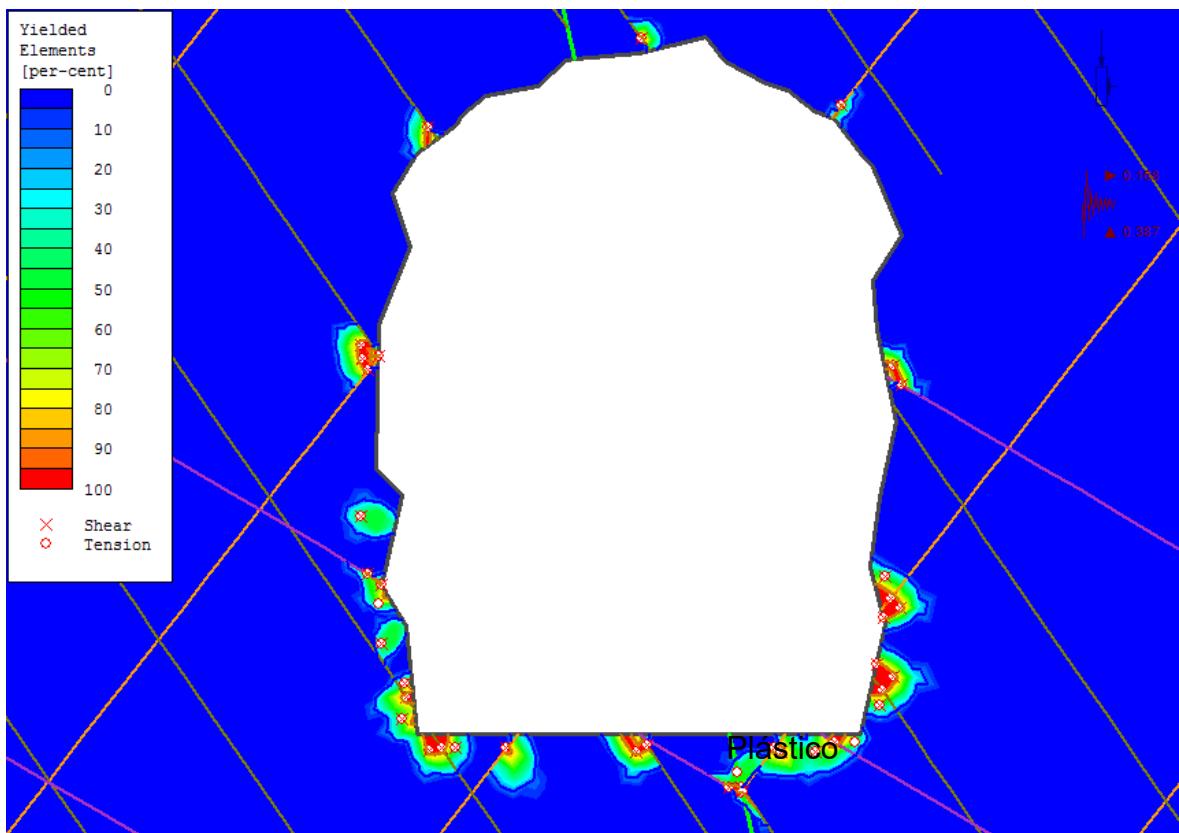


Figura 28. La EG-02 muestra Plastificaciones de Baja Incidencia solo alojándose en Sectores Puntuales del Túnel, formando Pequeñas Aureolas de Deformación Rocosa.

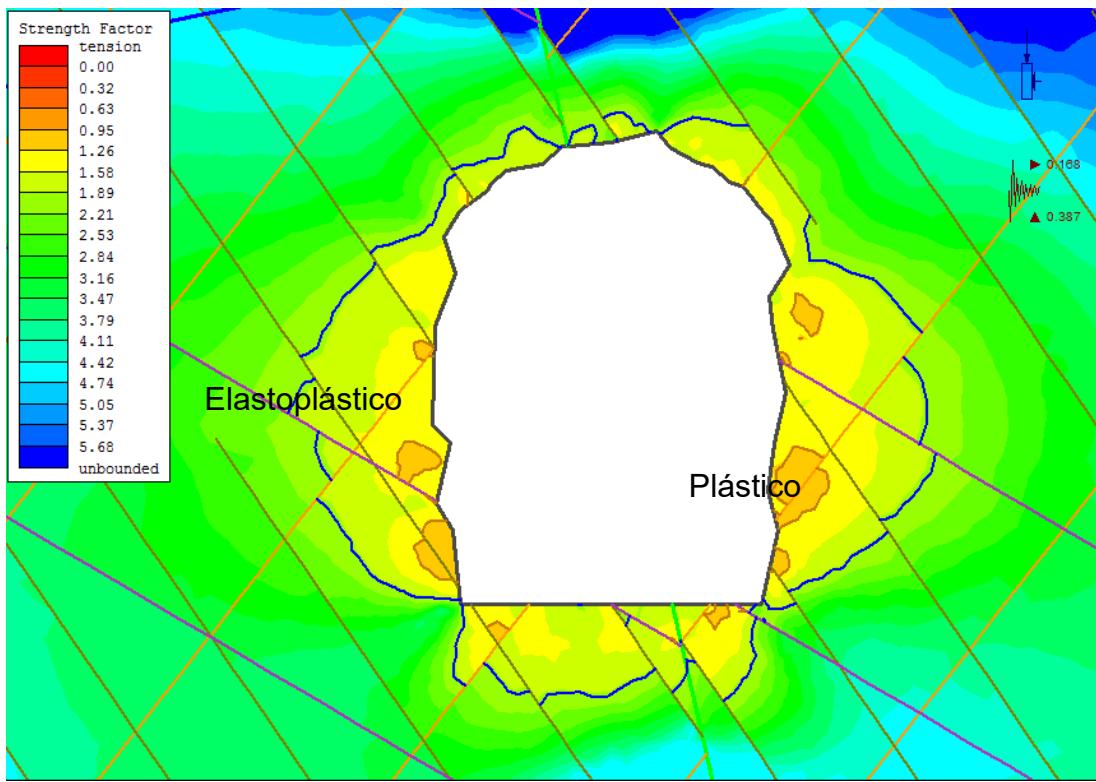


Figura 29. Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-02, formando Aureola Circular en el Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.164 m.) y Elastoplástico (0.163 m. a 0.446 m.).

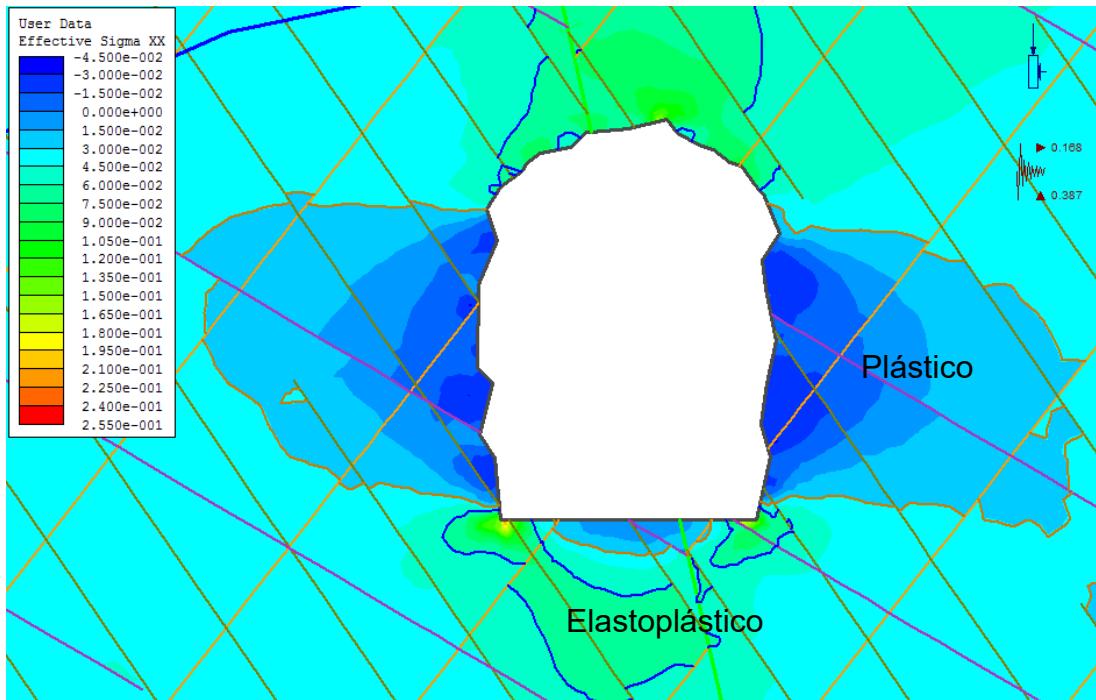


Figura 30. Variación del Campo Tensional formando una Elipse Tensodeformacional relacionada con el Esfuerzo Mayor Horizontal, ocasionando Inestabilidades de Mayor Magnitud afectando al Túnel en la EG-02.

- **Estación Geomecánica 03**

Se ubica desde: Pi+57.85 m. a Pi+67.85 m. , cuya sección del túnel es de 1.10 m. x 1.85 m. en forma de baúl a una profundidad de columna de roca de 18.40 m., conformada litológicamente por areniscas de calidad media de color blanquecino con superficies ligeramente alteradas a inalteradas; con parámetros geomecánicos:  $\sigma_{ci} = 108$  MPa, ND = 17, L = 1.50 y  $\lambda = 11.33$ ; RQD = 68.68%, RMR = 57, GSI = 52 y Q = 7.19; y parámetros elásticos de roca:  $\sigma'_{3\max} = 0.2762$  MPa,  $k = 1.66$ ,  $\sigma_1 = 0.46$  MPa.

#### Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 108 MPa  
 $GSI = 53$  mi = 19 Factor de disturbancia = 0.80  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 33,804 MPa  
 Modulus ratio (MR) = 313

#### Criterio Hoek – Brown

$mb = 1.158$   $s = 0.0008$   $a = 0.505$

#### Morh - Coulomb

Cohesión = 0.351 MPa Ángulo de fricción = 61.90°

#### Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.075 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 2.969 MPa  
 Resistencia global = 15.339 MPa  
 Módulo de deformación = 3,737.44 MPa

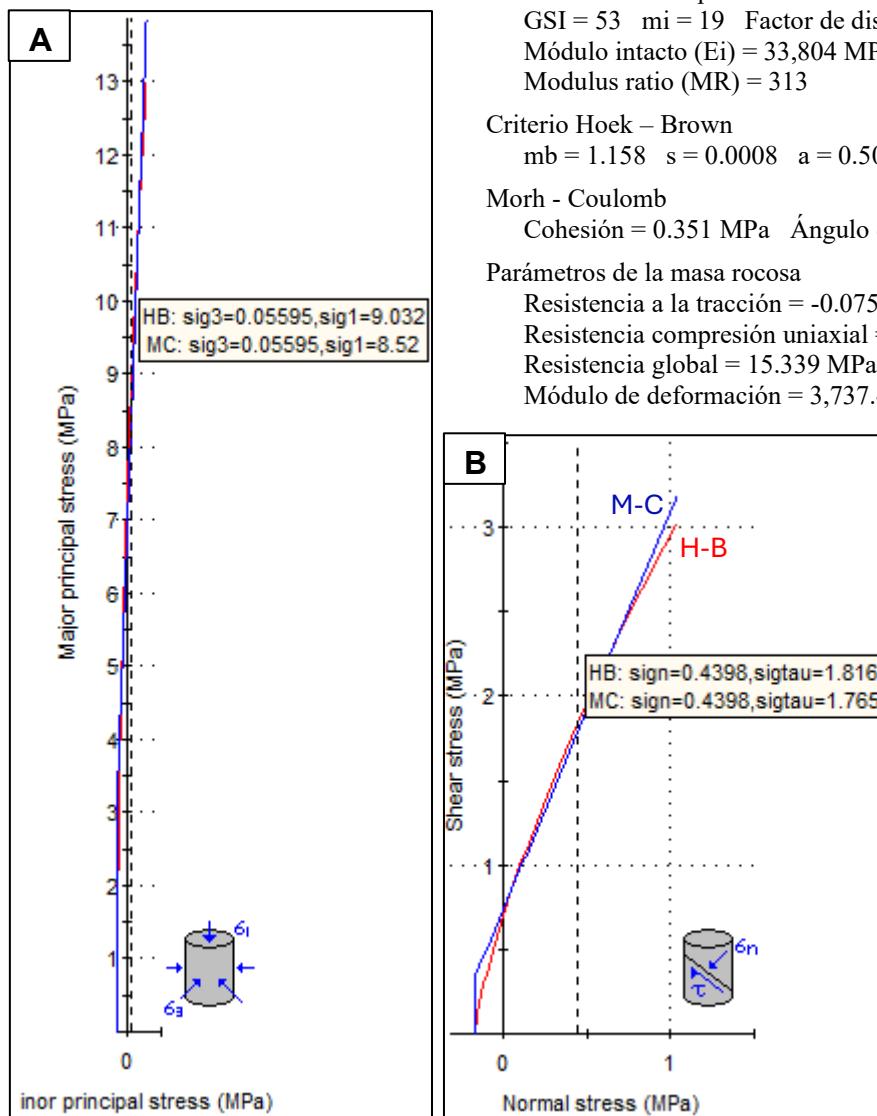


Figura 31. Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y B. Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-03.

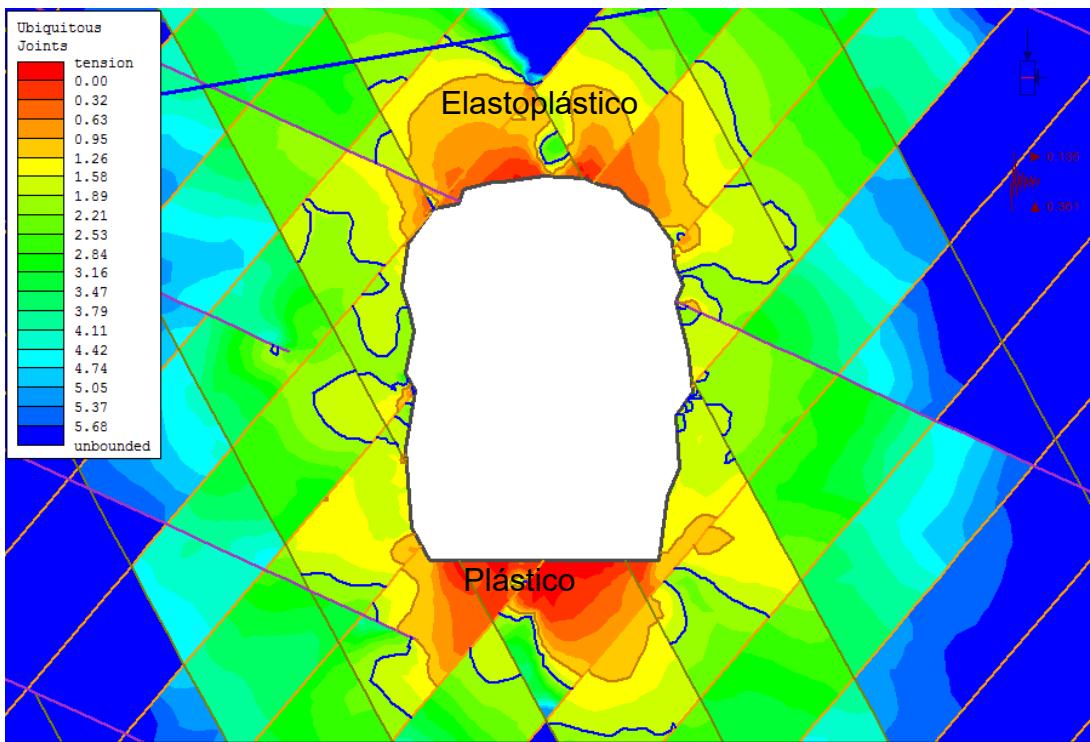


Figura 32. Envolventes del Campo Tensodeformacional formado por el Sistema de Diaclasas sometida al de Forma Elíptica, formando Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.080 m. a 0.586 m.) y lastoplástico (0.099 m. a 0.295 m.), EG-03.

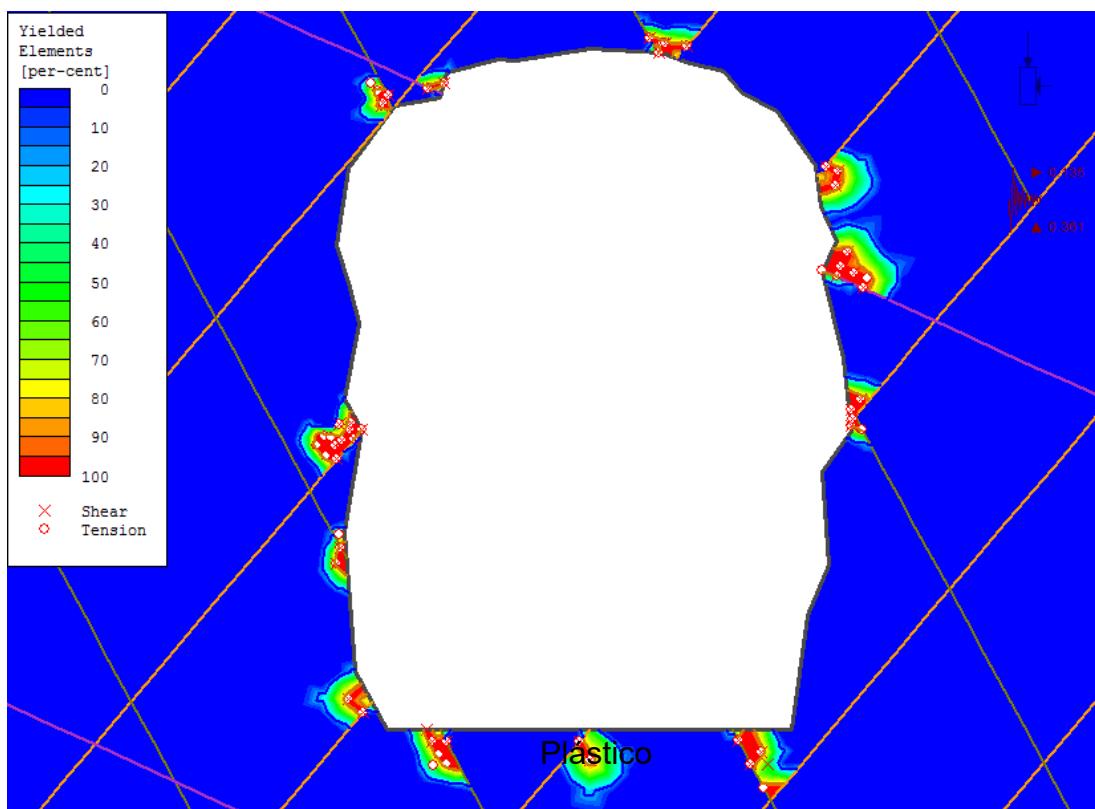


Figura 33. La EG-03 muestra Plastificaciones de Baja Incidencia, solo alojándose en Sectores de Intersección de Juntas formando Pequeñas Aureolas de Deformación Rocosa, no superando los 0.10 m.

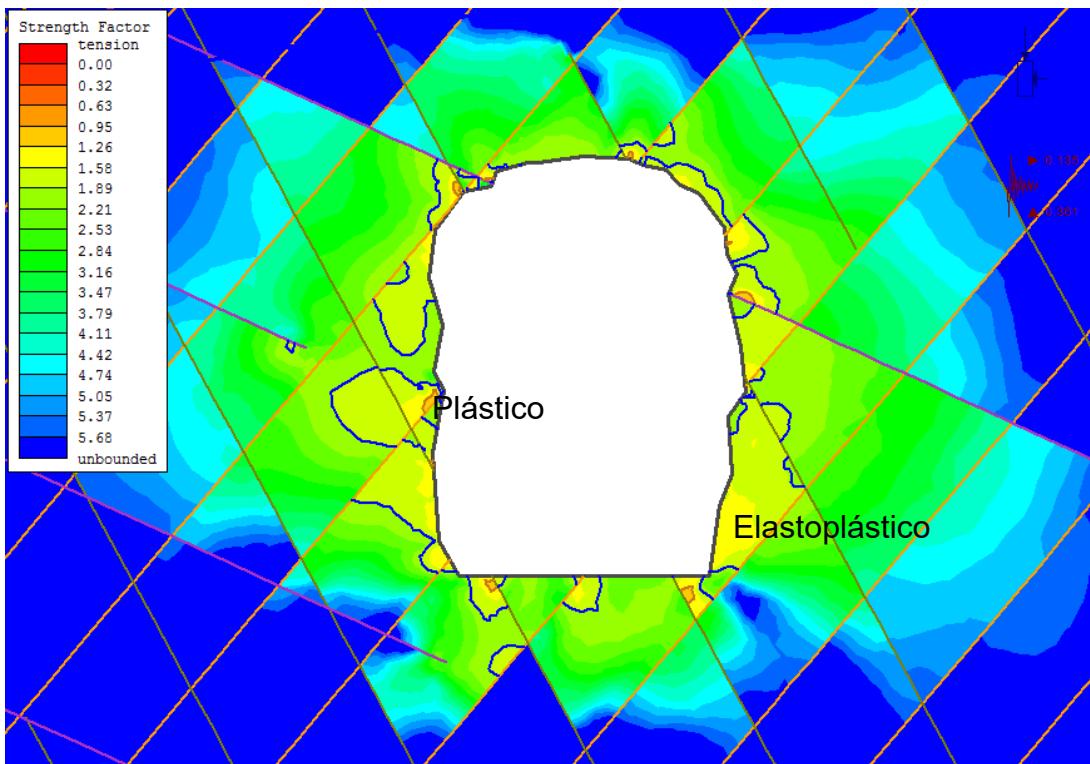


Figura 34. Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-03, formando una Aureola Elíptica alrededor del Túnel de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.100 m.) y Elastoplástico (0.050 m. a 0.214 m.).

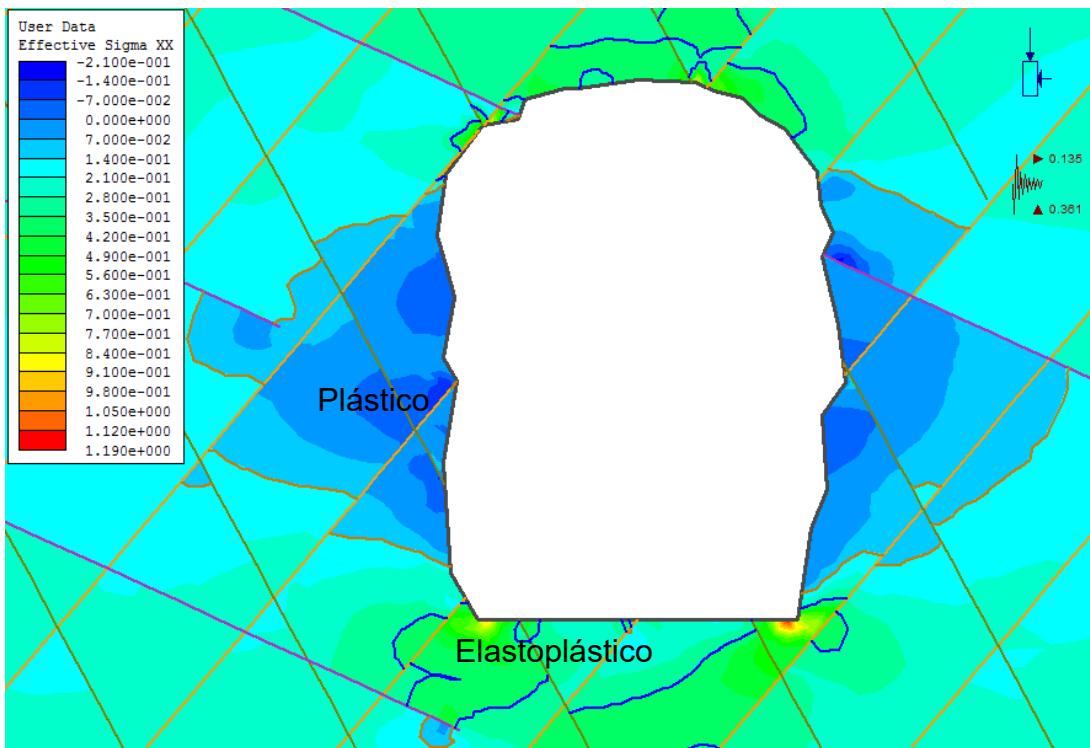


Figura 35. La Variación del Campo Tensional muestra una Elipse Tensodeformacional formando Inestabilidades en la EG-03, proyectándose desde: 0.78 m. a 0.85 m. en el Medio Plástico.

- **Estación Geomecánica 04**

Constituida desde: Pi+91.70 m. a Pi+101.70 m., con sección de túnel de 1.80 m. x 2.20 m. en forma de baúl a una profundidad de columna de roca de 18.80 m., conformado por areniscas de grano medio de color blanquecino con superficies inalteradas de juntas de abertura desde: 1 mm. a cerrada, de rugosidad lisa a suave y blocosidad tabular; con parámetros geomecánicos:  $\sigma_{ci} = 121$  MPa, ND = 14, L = 1.75 y  $\lambda = 8.00$ ; RQD = 80.88%, RMR = 72, GSI = 67 y Q = 15.64; y parámetros elásticos de roca:  $\sigma'_{3\max} = 0.2842$  MPa,  $k = 1.65$ ,  $\sigma_1 = 0.47$  MPa.

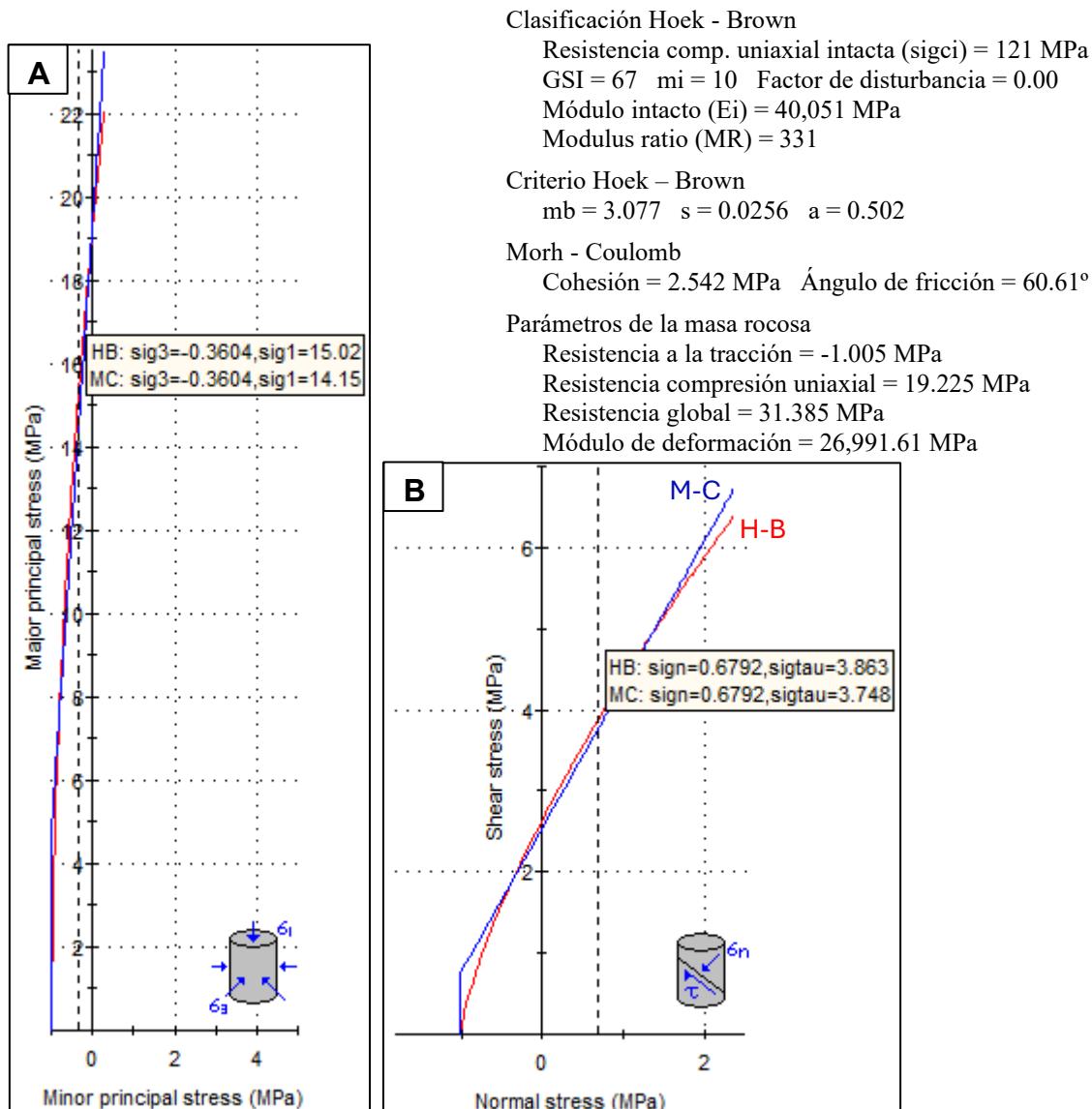


Figura 36. Reporte de Criterio de Rotura de Esfuerzo: A. Menor vs. Mayor (H-B) y Normal vs. Corte (M-C), utilizando el Método de Equivalencia de Áreas; EG-04.

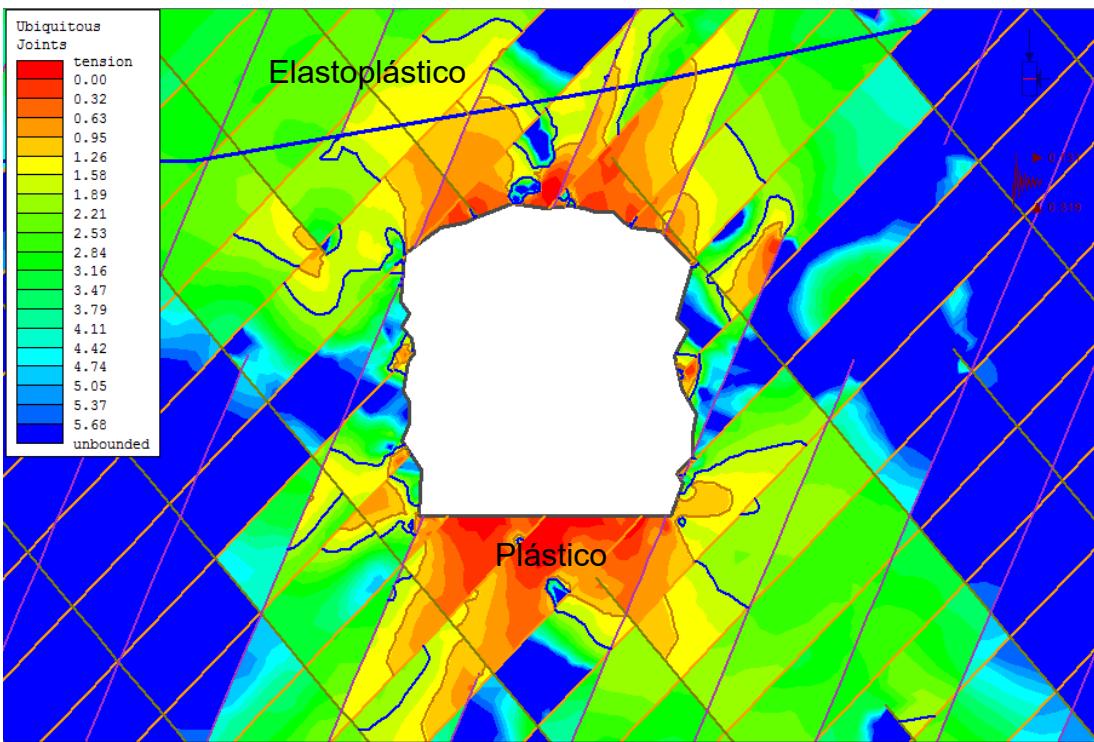


Figura 37. Campo Tensodeformacional del Sistema de Diaclasas sometida al de Forma Elíptica Subvertical, formando Sectores de Inestabilidad de la Amplitud: Medio Plástico (0.750 m. a 0.733 m.) y Elastoplástico (0.080 m. a 0.507 m.), EG-04.

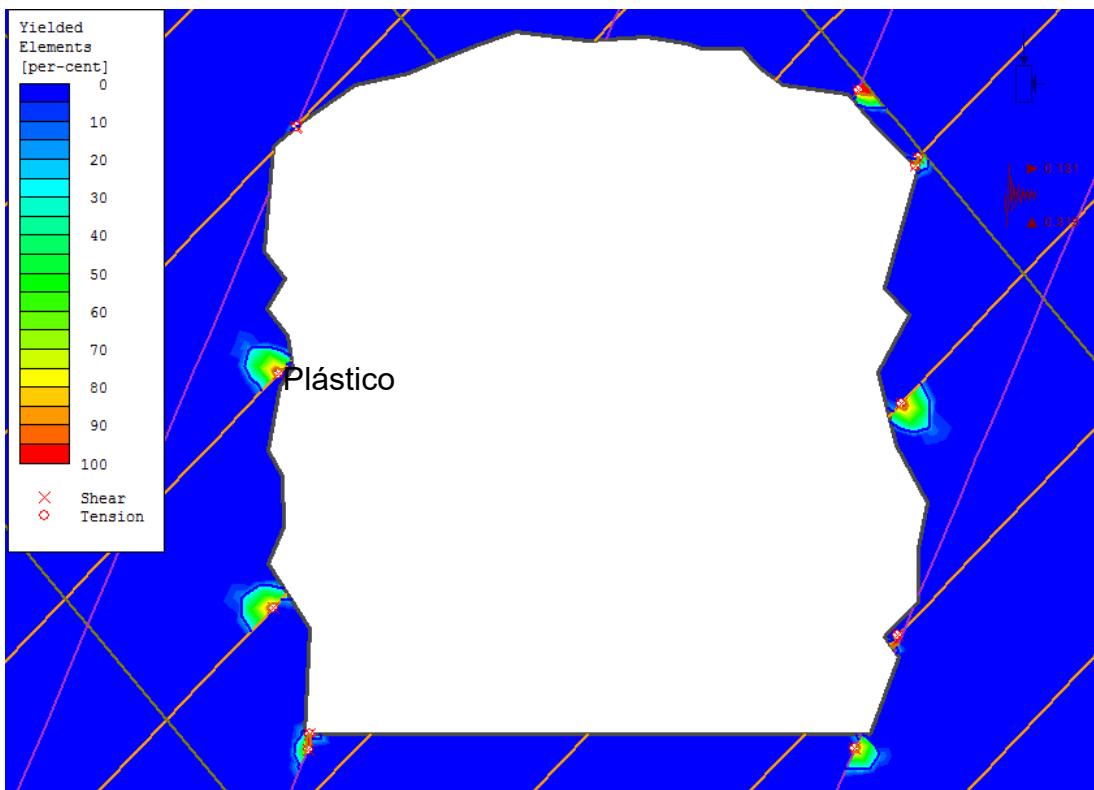


Figura 38. La EG-04 muestra Rocas de Buena Calidad de Superficie Inalterada, plasmando Bajas Plastificaciones, las cuales se forman en Sectores Puntuales del Túnel, no afectando su Estabilidad.

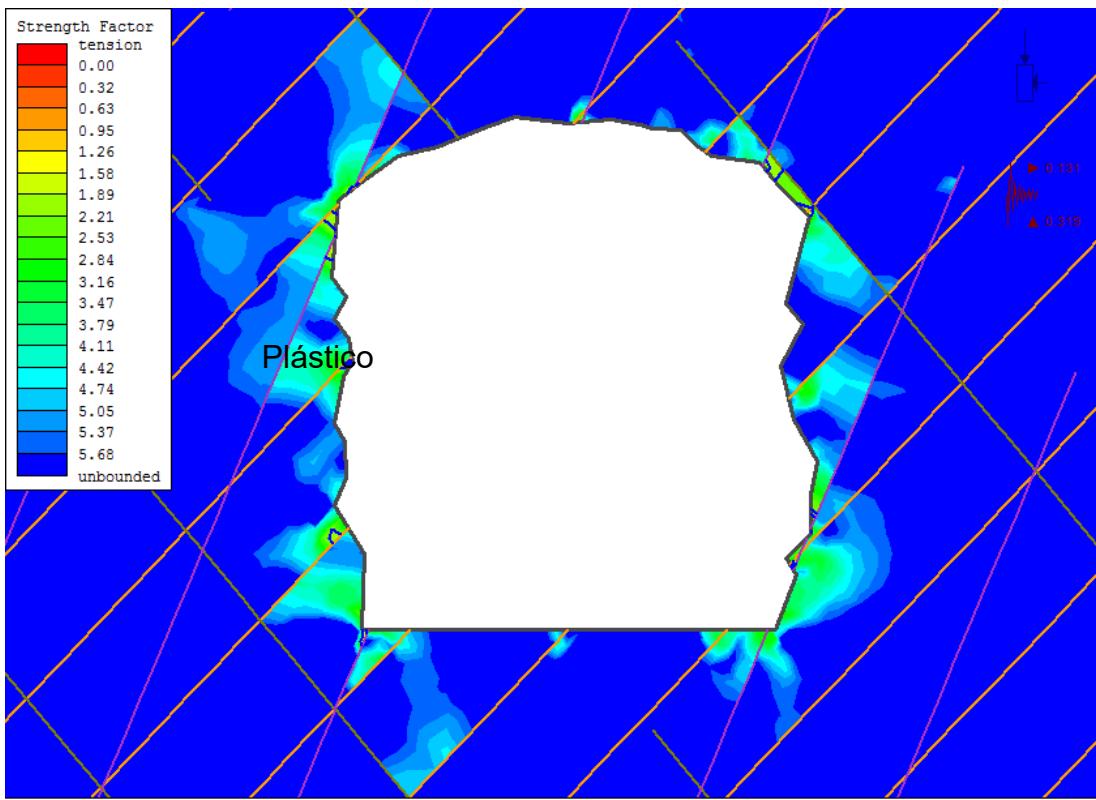


Figura 39. Estado Tensodeformacional de la Interacción del FS en la EG-04, formando Aureola Irregular por ser Roca de Buena Calidad de Amplitud: Medio Plástico (0.000 m. a 0.008 m.) y Elastoplástico (0.000 m. a 0.030 m.).

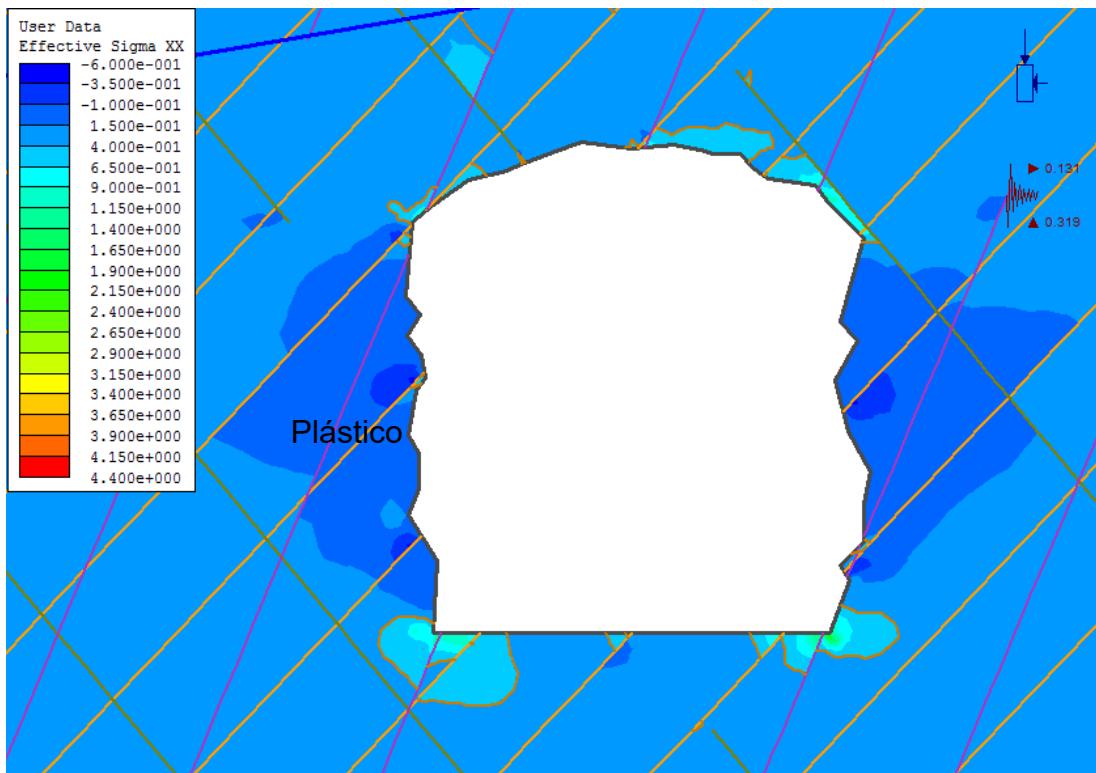


Figura 40. La Interacción de Agua Subterránea está formando Campos Tensionales de Amplitud Elíptica, afectando la Estabilidad del Túnel desde: 0.75 a 0.85 m., en la EG-04.

Tabla 17. Distribución Tensodeformacional alrededor de la Sección por Sistema de Diaclasas en el Medio: Plástico y Elastoplástico.

Estación geomecánica	Medio plástico			Medio elastoplástico				
	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)
	Derecho	Izquierdo			Derecho	Izquierdo		
EG-01	0.276	0.343	1.082	0.515	0.420	0.370	0.280	0.230
EG-02	0.256	0.172	0.595	0.801	0.275	0.235	0.256	0.281
EG-03	0.080	0.152	0.539	0.475	0.295	0.448	0.153	0.263
EG-04	0.127	0.167	0.742	0.859	0.080	0.120	0.379	0.120

Tabla 18. Amplitud de Distribución Tensodeformacional alrededor de la Sección por Factor de Seguridad por Medio: Plástico y Elastoplástico.

Estación geomecánica	Medio plástico			Medio elastoplástico				
	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)
	Derecho	Izquierdo		Derecho	Izquierdo			
EG-01	0.511	0.436	0.325	0.217	0.385	0.231	0.406	0.308
EG-02	0.150	0.164	-	0.086	0.365	0.446	0.183	0.363
EG-03	-	0.100	0.040	0.090	0.177	0.214	0.065	0.167
EG-04	-	-	-	-	-	-	0.015	-

Tabla 19. Amplitud de Plastificaciones por Esfuerzo: Corte y Tensión por Medio: Plástico y Elastoplástico.

Estación geomecánica	Medio plástico			Medio elastoplástico				
	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)	Hastial (m.)		Clave (m.)	Piso (m.)
	Derecho	Izquierdo		Derecho	Izquierdo			
EG-01	0.808	0.864	-	0.275	0.156	0.480	0.009	0.123
EG-02	1.482	1.376	-	0.121	-	-	0.825	0.443
EG-03	0.765	0.859	-	-	-	-	0.160	0.249
EG-04	-	-	0.076	0.258	-	-	-	-

Así mismo mediante la simulación por: FS y plastificación, se presenta bajos valores de inestabilidad por estar constituida por roca competente en las estaciones: EG-02, EG-03 y EG-04; por lo contrario la EG-01, requiere mejora constantemente por ser roca de muy mala calidad y estar muy propenso a desprendimiento y colapso de galería (Ver Anexo C. Plano N° 05: *Tensodeformacional. Plano N° 06: Zonificación crítica*).

#### **4.1.7 Sostenimiento**

En base a la caracterización geomecánica, cartografiado geológico, análisis tenso-deformacional y a partir de la definición de zonas críticas del túnel de la Mina San Sebastián, se definió los siguientes tramos del túnel que requieren sostenimiento:

*Tramo desde Pi + 00.00 m. a Pi +12.15 m.:* Perteneciente a la estación EG-01, conformado por: Deposito Coluvio-Deluvial y Formación Chimú; siendo necesario, debido a la composición del material circundante, implementar sostenimiento con cuadros de madera cónicos o trapezoidales de altura 1.50 m., sombrero 1.40 m., tirante 1.00 m., acostillado 0.20 m. de ancho cada 0.10 m. de espaciado y cribado de 0.25 m.; siendo necesario utilizar madera de eucalipto de diámetro 0.20 m. (Ver Anexo C. Plano N° 07: *Sostenimiento*).

*Tramo Pic + 10.75 m.:* En dicho tramo, se evidencia relleno hidráulico proveniente de operaciones mineras de los colindantes, afectando a la estabilidad del macizo rocoso del túnel debido a la sobresaturación de agua; siendo de vital importancia, para mejorar la estabilización, implementar sostenimiento con muro de concreto armado de: altura de 2.40 m., hastial de 1.70 m. y espesor de 0.25 m. (Ver Anexo C. Plano N° 07: *Sostenimiento*).

*Tramo Pi + 100.00 m. a Pi+107.80 m.:* Sostenimiento por cuadros cónicos de dimensiones: altura de 1.75 m., sombrero de 1.80 m., tirante de 1.00 m., acostillado de 0.20 m. de ancho cada 0.10 m. de espaciado y cribado de 0.30 m.; siendo necesario utilizar madera de eucalipto de diámetro 0.20 m. (Ver Anexo C. Plano N° 07: *Sostenimiento*).

## **4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Según Castrejon (2024), plasmó que la labor subterránea estudiada en su investigación, está delimitada por el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca con Az = N125°, conformada litológicamente por la Formación Chimú de roca arenisca de color blanquecino de grano medio de calidad mala, media y buena. Además, Alfaro y Muguerza (2021), muestran que el túnel, estudiado en su investigación, está compuesto por roca arenisca cuarzosa de calidad mala, regular y buena, pertenecientes a la Formación Chimú, ubicado en el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca con Az = N130°. Por consiguiente, Idrogo (2025), muestra que su investigación se relaciona con las anteriores, ya que el sector en estudio está ubicado en el flanco izquierdo del anticlinal Algamarca, conformado litológicamente por Depósito Coluvio-deluvial y Formación Chimú con secuencias de roca arenisca de color blanquecino de estratos uniformes subverticales de geometría tabular de grosor: 0.30 m. a 0.45 m. de grano medio con orientación DD/D = 220°/48°SW, reportando rocas de calidad mala, regular y buena.

Así mismo Castrejon (2024) manifiesta que, en la galería principal estudiada en su investigación, se ocasionan cambios tenso-deformacionales por el estallido de rocas, plasmando aureolas: Semicirculares, elípticas y homogéneas, por afectación del medio plástico desde: 0.67 m. a 1.80 m. de profundidad transversal. Por consiguiente, Idrogo (2025) reporta en su investigación resultados similares, para el estado tensional del túnel muestra que el medio plástico proyecta afectación al hastial desde 0.080 m. a 0.343 m., a la clave desde 0.539 m. a 1.082 m. y al piso desde 0.475 m. a 0.801 m.; además muestra que el medio elastoplástico afecta al hastial del túnel desde 0.080 m. a 0.448 m., a la clave desde 0.153 a 0.379 y al piso desde 0.120 m. a 0.281 m., afectando transversalmente la estabilidad del túnel.

#### **4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

Desarrollada la investigación en el túnel de la Mina San Sebastián, se logra contrastar que, desde Pi+12.15 m. a Pi+120.00 m., dicho túnel está emplazado en areniscas de grano medio de color blanquecino pertenecientes a la Formación Chimú, conformado por estratos uniformes subverticales de geometría tabular de grosor desde 0.30 m. a 0.45 m. y orientación DD/D = 220°/48°SW; además se logra contrastar que, desde Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. , se presenta un depósito Coluvio-deluvial, de color castaño a anaranjado contenido fragmentos de roca angulosa de dimensiones desde 0.25 m. a 0.30 m., con matriz englobante de material fino de estructura desordenada y poco compacta; evidenciándose inestabilidades en las secciones subterráneas del túnel debido a la acumulación tensional gravitatoria progresiva, principalmente desde Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m., siendo un sector de alta inseguridad conformado por roca de muy mala calidad y depósito residual; además el túnel está delimitado por la formación de cuñas geoestructurales, siendo necesario solo desquinchado de roca, mejorando así la seguridad de los trabajadores.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

La evaluación geomecánica se fundamentó en cuatro clasificaciones: RQD (EG-01 = 30.08, EG-02 = 55.78, EG-03 = 68.68 y EG-04 = 80.88), RMR (EG-01 = 28, EG-02 = 49, EG-03 = 57 y EG-04 = 72), GSI (EG-01 = 23, EG-02 = 44, EG-03 = 52 y EG-04 = 67) y Q (EG-01 = 0.85, EG-02 = 6.27, EG-03 = 7.19 y EG-04 = 15.64), cuantificándolas desde rocas de calidad: Mala (EG-01), media (EG-02, EG-03) y buena (EG-04).

El cartografiado geológico del eje del túnel está conformado por: Depósito Coluvio-deluvial, desde Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. de color castaño a anaranjado con fragmentos de roca angulosa de dimensiones de 0.25 m. a 0.30 m., con matriz englobante de material fino de estructura desordenada y poco compacta; y Formación Chimú desde Pi+12.15 m. a Pi+120.00 m. con secuencias de roca arenisca de color blanquecino de estratos uniformes subverticales de geometría tabular de grosor de 0.30 m. a 0.45 m. de grano medio con orientación DD/D = 220°/48°SW.

El análisis tenso-deformacional muestra que el medio plástico afecta al hastial desde 0.080 m. a 0.343 m., a la clave desde 0.539 m. a 1.082 m. y al piso desde 0.475 m. a 0.801 m.; y el medio elastoplástico afecta desde 0.080 m. a 0.448 m. al hastial, a la clave desde 0.153 m. a 0.379 m. y al piso desde 0.120 m. a 0.281 m.; afectando transversalmente la estabilidad de la galería.

Se evidenciaron dos zonas críticas ubicadas: en el tramo Pi+00.00 m. a Pi+12.15 m. conformado por roca de mala calidad y depósito Coluvio-deluvial; y en Pi+116.50 m. conformada por falla geológica de apertura 2.50 cm. a 5.00 cm. drenando agua constante con caudal  $Q = 2.45 \text{ Lt/s}$  de la clave.

El tipo de sostenimiento a utilizar desde Pi + 00.00 m. a Pi +12.15 m. será por cuadros cónicos de madera de una altura de 1.55 m., sombrero de 1.40 m., tirante de 1.00 m., acostillado de 0.20 m. de ancho con un espaciado cada 0.10 m. y cribado de 0.25 m.; así mismo en el tramo Pic +10.75 m. se debe realizar estabilización mediante muro de concreto armado de: Altura de 2.40 m., hastial de 1.70 m. y espesor de 0.25 m.; y en el tramo Pi + 100.00 m. a Pi+107.80 m. el sostenimiento debe ser por cuadros cónicos de madera de dimensiones: altura de 1.75 m., sombrero de 1.80 m., tirante de 1.00 m., acostillado de 0.20 m. de ancho con un espaciado cada 0.10 m y cribado 0.30 m., siendo necesario utilizar madera de eucalipto de diámetro 0.20 m.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

A la empresa, implementar una red de extensómetros de alta precisión en las zonas críticas determinadas en la presenta tesis, para monitorear deformaciones y detectar posibles desplazamientos del macizo rocoso, lo que permitirá una respuesta temprana y efectiva ante situaciones de inestabilidad.

Al área de Geomecánica, realizar actualizaciones geomecánicas de la roca circundante incorporando análisis de estabilidad, para garantizar que la operación minera se ajuste a las condiciones cambiantes del macizo rocoso.

A los futuros investigadores, utilizar modelos numéricos avanzados y técnicas de monitoreo en tiempo real para mejorar la precisión en la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alfaro, V., y Muguerza, S. 2021. Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento del Nv.2 Mina Nueva Esperanza, Consorcio minero HNS – Algamarca, 2021. Universidad Privada del Norte – Facultad de ingeniería – Ingeniería geológica.
- Barton, N., Lien, R., y Lunde, J. 1974. Clasificación ingenieril de la masa rocosa para el diseño del sostenimiento de túneles. *Mecánica de rocas* 6(4), págs. 189 – 236. Recuperado de  
[https://www.researchgate.net/publication/226039636\\_Engineering\\_Classification\\_of\\_Rock\\_Masses\\_for\\_the\\_Design\\_of\\_Tunnel\\_Support](https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support)
- Benel, R. 2019. Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo – Cajamarca (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de ingeniería - Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Berrocal, M. 2015. Estabilidad de Excavaciones Subterráneas. Lima - Perú: Ventura Graf.
- Bieniawski, Z. 1989. Clasificación de masa rocosa ingenieril. New York- Universidad del Estado de Pensilvania: Edición: Jhon Wiley & Sons. Recuperado de  
<https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PR11&dq=engineering+rock+mass+classifications+bieniawski+1989+pdf&ots=4TmcQz1YTt&sig=3z82jxPjZrtBSmTu8WRiprA5Q#v=onepage&q&f=false>
- Brady, B., y Brown, E. 2006. Rock mechanics for underground mining 3ra edition. Trad. Franklin Montoya. Ámsterdam - The Netherlands: Springer.
- Cotrado, M., y Amado, D. 2022. Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de un sostenimiento adecuado de mina Chaparra Caravelí, Arequipa – 2021(Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica del Perú – Facultad de Ingeniería – Ingeniería de Minas.
- Castrejon, L. 2019. Estallido de rocas del crucero El Ñato, Nivel 2880 - Empresa Minera HNS Consorcio S.R.L., San Miguel de Algamarca – Cajabamba –

- Cajamarca (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de ingeniería - Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Celada, T. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas tomo 1: Concepto y diseño del sostenimiento de túneles., págs. 815 – 854. Móstoles – Madrid: Graficas arias montano, S.A.
- Davis, G. 1984. Structural geology of rocks and regions. New York – Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.: 447 p.
- Daemen, J. 1977 Problems in tunnel support mechanics. *Underground Space*, 1(3): 163–72.
- Davila, B. 2011. Diccionario geológico. INGEMMET. Lima – Perú: Arth Grouting S.A.C.
- Deere, D. 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. And Rock Engrg.*, 1, págs. 107-116.
- Garcia, R. 2023. Evaluación geomecánica del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento y estabilidad en las zonas de explotación Hércules, Unidad Minera Huancapeti, 2023 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Gavilanes, J., y Andrade, H. 2004. Introducción a la ingeniería túneles: Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. Quito – Ecuador. Asociación de ingenieros de minas del Ecuador (AIME).
- González, L. 2002. Ingeniería Geológica. Madrid: Prentice Hall.
- Gómez, M. 2022. Caracterización, zonificación geomecánica y recomendación del sostenimiento necesario para la estabilidad de labores y temporales y permanentes del macizo rocoso en el Nivel 1712 del cuerpo Zeus de la Mina Roble (Tesis pregrado). Universidad de caldas, Facultad de ciencias exactas y naturales, programa de geología, Recuperado de [https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstream/handle/ucaldas/17402/Mateo\\_GomezRodriguez\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstream/handle/ucaldas/17402/Mateo_GomezRodriguez_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gullón, A. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas 2: Capítulo 26 sostenimiento con cerchas metálicas. Madrid – España: Gráficas Arias Montano, SA.
- Hudson, J. 2010. Engineering properties of rocks: Elsevier geo-engineering book series. 4 volume. Londres – Inglaterra. Pergamon Press.

- Ingeoexpert. 2025. Curso de modelación RS2. Madrid - España.
- Jamchiki, R., Dastpak, P., Sousa, R., Ardila, E. 2023. Numerical Investigation of Reinforced Soil Segmental Walls Using Two-Dimensional Finite Element Analysis in RS2. ResearchGate. RIC 2023, AHE 19, pp. 362–372, 2023.
- Jordá, L., Tomás R., Arlandi, M., y Abellán, A. 2016. Manual de estaciones geomecánicas: Descripción de macizos rocosos en afloramientos. Madrid – España: Graficas Arias Montano, S.A.
- Lascano, F. 2022. Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de la abscisa 0+2100 a la 0+2400 del decline localizado en el área minera Cascabel (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- López, C. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas Tomo I. Madrid – España: Gráficas Arias Montano, S.A.
- Lorig, L. 2009. Aplicación de Modelos Numéricos Continuos y Discontinuos al Análisis de Excavaciones Subterráneas en Macizos Rocosos. Jornada Técnica de Cálculo de Túneles. Madrid: Sociedad Española de Mecánica de Rocas (SEMR).
- Lunder, P., y Pakalnis, R. 1997. Determination of the strength of hard-rock mine pillars. Bull. Can. Inst. Min. Metall. 90; p. 51-55.
- Marin, C. 2023. Evaluación geomecánica para el diseño de sostenimiento de las zonas de producción Norte Unidad Minera acumulación Parcoy, La Libertad, 2023 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Mendoza, J. 2022. Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la construcción y sostenimiento de la chimenea-226, por el método raise climber Mina Lourdes en la EUA Parcoy (Consorcio Minero Horizonte SA) (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas.
- Millán, S. 2022. Evaluación geomecánica de la masa rocosa para selección del sostenimiento – Minera Animón 2022 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú – Facultad de Ingeniería de Minas.
- Moreira de Alencar, V., y De Andrade, F. 2021. Sobre el diseño del hormigón proyectado reforzado con fibra aplicado como soporte primario de roca en las excavaciones mineras subterráneas de Cuiabá. Revista ELSEVIER,

- estudios de caso en materiales de construcción. Pag. 1 a 11. Recuperado de: [www.elsevier.com/locate/cscm](http://www.elsevier.com/locate/cscm)
- Muñoz, P. 2023. Evaluación geomecánica del Nivel 4 de la Mina Paredones según los métodos Q de Barton y RMi para la aplicación de sostenimientos, San Pablo – Cajamarca (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de ingeniería - Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Nicolas, A. 1984. Principes de tectonique. Masson - Paris: 196 p. France.
- NGI. 2015. Using the Q-system. Oslo: Allkopi AS.
- Ochoa, A., Cartaya, M., y Blanco, J. 2020. Clasificación geomecánica óptima para evaluar el macizo rocoso en el frente de arranque del Tramo IV del túnel Levisa-Mayarí. Revista Minería y Geología, vol. 36, núm. 1, ISSN: 1993-8012
- Osinergmin. 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Magdalena del Mar, Lima - Perú: Edición: INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Palmstrom A. 1995. Characterising the strength of rock masses for use in design of underground structures, conf. Design and construction of underground structures, New Delhi, 43-52.
- Palmstrom, A. 2000. Recientes desarrollos en la estimación del sostenimiento en roca mediante RMi. published in: Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, vol. 6, No. 1, May 2000, págs. 1-19.
- Puell, F., Arenillas, M., De La Puente, P. 2004. La linealización del criterio de hoek-brown en el análisis de la estabilidad de taludes en roca. Dialnet: Revista de Obras Públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos, ISSN 0034-8619, Nº. 3446, 2004. págs. 37-44. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=937330>
- Priest, S., y Hudson, J. 1976. Discontinuity spacing in rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, págs. 135-148.
- Ramírez, O., De La Cuadra, I., Laín, H., y Grijalbo, O. 2008. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea. Instituto geológico y minero de España.
- Read, J., y Stacey, P. 2009. Guidelines for open pit slope design. Australia: Taylor & Francis Group.

- Reyes, R. 1980. Boletín N° 31 Serie A. Carta Geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Lima – Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Rodríguez, J. 2021. Caracterización del macizo rocoso para proponer un diseño sostenimiento en la compañía minera Marsa S.A 2021 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil – Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Romana, M. 2000. Uso de clasificaciones geomecánicas en las boquillas de túneles. Madrid – España.
- Romana, M. 2003. Nuevas Recomendaciones de Excavación y Sostenimiento para Túneles y Boquillas. Jornadas Hispano-Lusas sobre Obras Subterráneas. Madrid.
- Sen, Z. 1993. RQD-fracture frequency chart based on a Weibull distribution. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, págs. 555-557.
- Senamhi. 2023. Datos hidrometeorológicos en Cajamarca: Estación Cachachi. Recuperado de  
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=cajamarca&p=estaciones>
- Sen, Z., y Kazi, A. 1984. Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 21, págs. 203-212.
- Soberón, R. 2024. Propuesta de sostenimiento y controles para reducir la liberación de energía del Nivel 4 de Mina Paredones, San Pablo – Cajamarca (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ingeniería - Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.
- Stacey, T., y Page, C. 1986. Practical handbook for underground rock mechanics. Series on Rock and Soil Mechanics Vol. 12. Trans Tech Publications.
- Terzaghi, K. 1946. Defectos de roca y cargas sobre soporte de túnel: Túneles de roca con soportes de acero (eds RV Proctor & T. White). p.15-99. Londres – Inglaterra: Commercial Shearing, Youngstown, Ohio. Recuperado de  
<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015024486782;view=1up;seq=7;size=75>

- Vallejo, C. 2011. Aplicaciones del Índice GSI para el Mapeo Geomecánico y la definición del Sostenimiento de labores Mineras subterráneas. XI Congreso Peruano de Geología. Lima – Perú.
- Wyllie, D., y Mah, C. 2004. Ingeniería civil y minería de taludes rocosos. Ingeniería de taludes rocosos. Reino unido – Londres. Spon Press - Grupo Taylor & Francis.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA**

**ANEXO B: REGISTRO GEOMECÁNICO**

**ANEXO C: PLANOS**

## **ANEXO A**

### **AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA**

## **MINA SAN SEBASTIÁN E.I.R.L, LAS TRES CRUCES – CACHACHI – CAJABAMBA**

---

Las Tres Cruces, 10 de Enero del 2025.

### **CARTA N° 002-2025-RR.HH/MINA-SAN-SEBASTIÁN-E.I.R.L**

**SEÑOR:** Jhonatan Henry Idrogo Bustamante.  
Ex Alumno de la Universidad Nacional de Cajamarca – UNC (Escuela Profesional de Ingeniería de Minas)

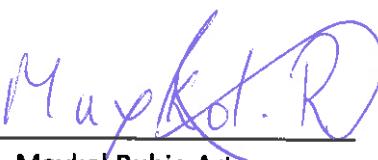
**ASUNTO:** Respuesta a solicitud de autorización para realizar Tesis en el Túnel de la Mina San Sebastián E.I.R.L.

**REFERENCIA:** SOLICITUD

Sr. Jhonatan Henry Idrogo Bustamante, reciba nuestro más sincero y cordial saludo en nombre de la empresa MINA SAN SEBASTIÁN E.I.R.L, recibida su SOLICITUD: AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR TESIS EN EL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, se concede el permiso para realizar tesis en el túnel ya mencionado con el tema: “EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES –CACHACHI – CAJABAMBA”, para optar el grado profesional de Ingeniero de Minas.

Sin otro particular, me despido, aprovechando la oportunidad para reiterar a Usted las muestras de mi consideración y estima.

Atentamente:



Maykol Rubio Arteaga  
Gerente Mina San Sebastián

## **ANEXO B**

### **REGISTRO GEOMECÁNICO**

**Tabla 20. Registro Geomecánico EG-01.**

**Tabla 21. Registro Geomecánico EG-02.**

REGISTRO GEOLÓGICO GEOMEÓNICO							TESIS	EVALUACIÓN GEOMEÓNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES – CACHACHI - CAJABAMBA												Subterráneo					
CÓDIGO	EG-02			TRAMO	2	DE	PI. + 21.55 m.			A	PI. + 31.55 m.			Profundidad (m.)	8.70	Parametros	valores								
RESPONSABLE	Idrogo Bustamante Jhonatan Henry			HOJA N°	2	COORDENADAS	-	ESTE (m.)	-	NORTE (m.)	-	COTA (msnm.)	-	σ1 (Mpa.)	0.218	θ	90°								
SISTEMA	WGS		84	ZONA 175	EJECUTADO POR		Idrogo Bustamante Jhonatan Henry			FECHA		10/06/2025			σ3 (Mpa.)	0.129	m	1.70							
DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN				MACIZO ROCOSO				PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS																	
FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION		TIPOS				RESIST. COMP. UNIAX.	RQD TRAMO		ORIENTACIÓN		ESPACIADO(m)	PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELENO		ALTERAC. METEOR.	AGUA	CALIDAD DE INFORMACIÓN				
DIS. Nro	1= Baúl		3	LITOLOGÍA FORMAC.	METEORIZAC IÓN	GRADO FRACT.	GSI	E=Estratificada o Seudo	σci	ND	DIRECCIÓN	1=>2	1=<1	1=Nada	1=Muy Rug.	1=Arcilloso	1=Ninguna	1=Inalterada	1=Seco	1=Lec. Real					
	2= Circular				D=Diaclasa					L		2= 2-0.6	2= 1-3	2=<0.1	2=Rugosa	2=Qz	2=Duro<5mm	2=Lig. Alt.	2=Húmedo	2=Lec. Apar.					
	3= Herradura				1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-Regul.	Fn=F.Normal				3= 0.6-0.2	3= 3-10	3= 0.1-1	3=Lig. Rug.	3=Calcita	3=Duro>5mm	3=Mod. Alt.	3=Mojado	3=Lec. Proy.					
	4= Cuadrada				2=Lev. Met.	2=Mediano	2=Bloq-Irrg.	Fi=F.Inversa				4= 0.2-0.06	4= 10-20	4= 1-5	4=Ondulad.-lisa	4=Óxidos	4=Suave<5mm	4=Muy Alt.	4=Goteo						
	5= Rectangular				3=Mod	3=Bajo	3=Bloq-Capas	Fd=F.Directa				5=<0.06	5=>20	5=>5	5=Suave	5=Roca Tritur.	5=Suave>5mm	5=Descomp.	5=Flujo						
	6= Elíptica				4=Alt. Met.	4=Fract-Intenso	mf=Microfalla					6=Bx													
	7= Irregular				5=Compl.	Agregar	SE=Sobrees.	MB,B,M,P,MP				7=Panizo													
1	1.70	2.53	1.65	1.30	-	-	Chimú	1	1	3	E	R5 (115 MPa)	55.78	145	52	235	V	3	3	3	4	3	1	2	1
2											R5 (115 MPa)	55.78	143	51	233	V	2	2	2	4	4	3	2	2	1
3											R5 (115 MPa)	55.78	148	48	238	V	2	3	1	5	-	-	-	2	1
4											R5 (115 MPa)	55.78	150	47	240	V	3	3	3	5	4	3	1	3	1
5											R5 (115 MPa)	55.78	142	50	232	V	2	2	1	4	-	-	-	2	1
6											R5 (115 MPa)	55.78	151	42	241	V	3	3	2	5	1	5	2	2	1
7											R5 (115 MPa)	55.78	143	53	233	V	3	3	1	5	-	-	-	2	1
8											R5 (115 MPa)	55.78	148	48	238	V	3	3	2	5	1	5	1	2	1
9											R5 (115 MPa)	55.78	140	42	230	V	2	2	3	4	4	3	1	3	1
10											R5 (115 MPa)	55.78	148	51	238	V	3	3	1	5	-	-	-	2	1
11											R5 (115 MPa)	55.78	153	56	243	V	3	2	2	5	1	5	1	2	1
12											R5 (115 MPa)	55.78	147	49	237	V	3	3	3	4	4	3	2	2	1
13											R5 (115 MPa)	55.78	150	53	240	V	2	2	2	5	1	5	1	3	1
14											R5 (115 MPa)	55.78	153	40	243	V	3	3	1	4	-	-	-	2	1
15											R5 (115 MPa)	55.78	146	44	236	V	3	3	1	4	-	-	-	2	1
16											R5 (115 MPa)	55.78	60	70	150	V	4	1	1	5	-	-	-	2	1
17											R5 (115 MPa)	55.78	58	68	148	V	3	1	2	4	1	5	1	3	1
18											R5 (115 MPa)	55.78	55	58	145	V	4	1	1	5	-	-	-	2	1
19											R5 (115 MPa)	55.78	48	65	138	V	4	1	2	5	1	5	2	2	1
20											R5 (115 MPa)	55.78	51	53	141	V	3	1	1	5	-	-	-	3	1
21											R5 (115 MPa)	55.78	55	71	145	V	4	1	2	5	1	5	1	2	1
22											R5 (115 MPa)	55.78	53	68	143	V	3	1	2	4	1	5	1	2	1
23											R5 (115 MPa)	55.78	61	64	151	V	3	1	1	5	-	-	-	2	1
24											R5 (115 MPa)	55.78	52	57	142	V	3	1	2	4	1	5	1	2	1
25											R5 (115 MPa)	55.78	57	55	147	V	4	1	2	5	1	5	2	3	1
26											R5 (115 MPa)	55.78	53	60	143	V	4	1	2	4	1	5	2	2	1
27											R5 (115 MPa)	55.78	50	70	140	V	4	1	2	4	1	5	1	2	1
28											R5 (115 MPa)	55.78	47	61	137	V	3	1	1	5	-	-	-	2	1
29											R5 (115 MPa)	55.78	43	68	133	V									

**Tabla 22. Registro Geomecánico EG-03.**

REGISTRO GEOLÓGICO GEOMEÓNICO							TESIS	EVALUACIÓN GEOMEÓNICA PARA DETERMINAR LA INESTABILIDAD DEL TÚNEL DE LA MINA SAN SEBASTIÁN, LAS TRES CRUCES – CACHACHI - CAJABAMBA												Subterráneo																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
CÓDIGO	EG-03			TRAMO	3	DE	PI. + 57.85 m.			A	PI. + 67.85 m.			Profundidad (m.)	18.40	Parametros	valores																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
RESPONSABLE	Idrogo Bustamante Jhonatan Henry			HOJA N°	3	COORDENADAS	-	ESTE (m.)	-	NORTE (m.)	-	COTA (msnm.)	-	Ø1 (Mpa.)	0.460	θ	90°																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
SISTEMA	WGS	84	ZONA 175	EJECUTADO POR	Idrogo Bustamante Jhonatan Henry			FECHA			10/06/2025			Ø3 (Mpa.)	0.276	m	1.66																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION		MACIZO ROCOSO			TIPOS		RESIST. COMP. UNIAX.		RQD TRAMO		ORIENTACIÓN		ESPACIADO(m)		PERSIST. (m)	ABERTURA (mm)	RUGOS.	RELENO		ALTERAC. METEOR.	AGUA	CALIDAD DE INFORMACIÓN																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1= Baúl		5		LITOLOGÍA FORMAC.			E=Estratificada o Seudo		D=Diaclasa		$\sigma_c$		ND 17		DIRECCIÓN		1=>2	1=<1	1=Nada	1=Muy Rug.	1=Arcilloso	1=Ninguna	1=Inalterada	1=Seco	1=Lec. Real																																																																																																																																																																																																																																																																																															
2= Circular							1=Fresco		1=Alto						4=Lev. Met.		2= 0.6-0.2	2= 0.1-3	2=<0.1	2=Rugosa	2=Qz	2=Duro<5mm	2=Lig. Alt.	2=Húmedo	2=Lec. Apar.																																																																																																																																																																																																																																																																																															
3= Herradura							2=Mediano		2=Bloq-Irrg.						3=Mod		3= 0.0-0.06	3= 10-20	3= 1-5	3=Lig. Rug.	3=Calcita	3=Duro>5mm	3=Mod. Alt.	3=Mojado	3=Lec. Proy.																																																																																																																																																																																																																																																																																															
4= Cuadrada							3=Rectangular		3=Elíptica						4=Alt. Met.		5=<0.06	5=>20	5=>5	5=Suave	5=Roca Tritur.	5=Suave>5mm	5=Descomp.	5=Flujo																																																																																																																																																																																																																																																																																																
5= Rectangular							7= Irregular		CUNETA (m.)		4=Fract-Intenso		mf=Microfalla		Prom. Golpes		11.33		6=Bx		Z/R		7=Panizo		8=Veta		9=Epsomita		10=Hidrocincita		11=Yeso		12=																																																																																																																																																																																																																																																																																							
6= Elíptica							5=Compl.				Aregar		SE=Sobrees.		3 Golp		68.68		DIP		DD		COMPOBACION		12=		13=		14=		15=		16=		17=		18=		19=		20=		21=		22=		23=		24=		25=		26=		27=		28=		29=		30=		31=		32=		33=		34=		35=		36=		37=		38=		39=		40=		41=		42=		43=		44=		45=		46=		47=		48=		49=		50=		51=		52=		53=		54=		55=		56=		57=		58=		59=		60=		61=		62=		63=		64=		65=		66=		67=		68=		69=		70=		71=		72=		73=		74=		75=		76=		77=		78=		79=		80=		81=		82=		83=		84=		85=		86=		87=		88=		89=		90=		91=		92=		93=		94=		95=		96=		97=		98=		99=		100=		101=		102=		103=		104=		105=		106=		107=		108=		109=		110=		111=		112=		113=		114=		115=		116=		117=		118=		119=		120=		121=		122=		123=		124=		125=		126=		127=		128=		129=		130=		131=		132=		133=		134=		135=		136=		137=		138=		139=		140=		141=		142=		143=		144=		145=		146=		147=		148=		149=		150=		151=		152=		153=		154=		155=	

**Tabla 23. Registro Geomecánico EG-04.**

## **ANEXO C**

### **PLANOS**