

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

**“ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO
AFECTADO POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL
PORTAL DE SALIDA - TÚNEL CHACAHUARO II - LIMA”**

TESIS

Presentada Por:

Bach. Johnny Miranda Gómez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

**“ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO
AFECTADO POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL
DE SALIDA - TÚNEL CHACAHUARO II - LIMA”**

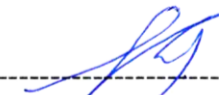
Tesis sustentada y aprobada el 29 de noviembre del 2018, integrada por el siguiente jurado calificador:

PRESIDENTE



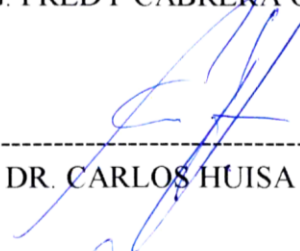
ING. PIO COILA VALDEZ

1er. MIEMBRO – SECRETARIO



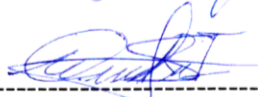
ING. FREDY CABRERA OLIVERA

2do. MIEMBRO



DR. CARLOS HUISA CORI

ASESOR DE TESIS



ING. HISMAEL RODRIGUEZ ILLACHURA

Dedicado a mi madre y esposa por su apoyo constante durante estos años.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al director de la Escuela de Ingeniería Geológica – Geotecnia, Ing. Pio Coila Valdez; al Ing. Julio Blas Iparraguirre, Jefe de la Oficina Técnica Desarrollo Vial de los Andes, por la autorización de información. Y muy especialmente al docente Ing. Hismael Rodríguez Illachura por su confianza y apoyo constante.

CONTENIDO

ABSTRACT	1
RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	4
1.1.2. PROBLEMA ESPECÍFICO.....	4
1.2. HIPÓTESIS PLANTEADA	5
1.2.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	5
1.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO	5
1.2.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.4. ANTECEDENTES.....	6
CAPITULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. ASPECTOS GENERALES.....	7
2.1.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD	7
2.1.2. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS	8
2.1.3. ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	8
2.2. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE EXCAVACIÓN (NATM)	9
2.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICAS.....	11
2.3.1. ROCK MASS RATING (RMR), BIENIASWSKI, 1989.....	12
2.3.2. INDICE DE DESIGNACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA (RQD) .	14
2.3.3. CRITERIO MODIFICADO DE MARINO & HOEK - BROWN, 2000....	15
2.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO	19
2.5. TENSO-DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	20
2.5.1. TENSIÓN Y DEFORMACIÓN DE LA ROCA INTACTA.	20
2.5.2. TENSIÓN DEL MACIZO ROCOSO.....	22
2.5.3. DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.....	27
2.6. MÉTODO NUMÉRICO POR ELEMENTOS FINITOS	28

2.7.	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	45
2.7.1.	GEOLOGÍA REGIONAL	45
2.7.2.	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	46
2.7.3.	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL	47
2.7.3.1.	GEOLOGÍA LOCAL	47
2.7.3.1.1.	GRUPO RIMAC (Tim_R)	47
2.7.3.1.2.	DEPÓSITOS CUATERNARIOS (Q)	48
2.7.3.2.	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	50
2.7.3.2.1.	UNIDADES MORFOLÓGICAS (Tim_R)	51
2.7.4.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	53
CAPÍTULO III		56
3.	MARCO METODOLÓGICO	56
3.1.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	56
3.2.	CAMPAÑAS DE TRABAJO DE CAMPO	57
3.3.	CAMPAÑA DE GABINETE	57
3.4.	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	59
3.4.1.	MODELO GEOLÓGICO	59
3.4.2.	MODELO GEOTECNICO	60
3.4.2.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	60
3.4.2.2.	DOMINIOS GEOTECNICOS	63
3.4.3.	MODELO MATEMÁTICO	65
3.4.3.1.	ALGORITMO	65
3.4.3.2.	CONDICIÓN DE CONTORNO	67
3.4.3.3.	DRISCRETIZACIÓN	67
CAPÍTULO IV		69
4.	CÁLCULOS Y RESULTADOS	69
4.1.	APLICACIÓN DEL MEF PARA EL ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL	69
4.2.	DISCUSIÓN	70
5.	CONCLUSIONES	84
6.	RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA		89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01: Área de ubicación –Túnel Chacahuaro II.....	7
Figura N° 02: Diagrama de transición desde condición de roca intacta a macizo rocoso muy fracturado.....	10
Figura N° 03: Diagrama de propiedades físicas y mecánicas de roca intacta.....	22
Figura N° 04: Tensiones en 3 dimensiones.....	23
Figura N° 05: Clasificación de esfuerzos en la roca.....	24
Figura N° 06: Vaciado de esfuerzos verticales contra la profundidad bajo la superficie.....	25
Figura N° 07: variación de la relación de esfuerzo horizontal medio al esfuerzo vertical con la profundidad bajo la superficie.....	26
Figura N° 08: Ilustración de los parámetros del MEF.....	30
Figura N° 09: Ilustración de los elementos del MEF Lineal.....	30
Figura N° 10: Elementos finitos sub paramétricos, isoparamétricos superparamétricos.....	31
Figura N° 11: Esquema representativo del modelo continuo y del modelo discreto.....	32
Figura N° 12: Modelación numérica por Elementos Finitos.....	33
Figura N° 13: Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las juntas y de la resistencia a compresión de la roca.....	35
Figura N° 14: Tipo de rotura en diferentes macizos rocosos bajo diferentes niveles de tensión.....	37
Figura N° 15: Ilustración de esfuerzos principales inducidos en un túnel horizontal de forma circular.....	38
Figura N° 16: Definición de los valores tensionales y geométricos para la obtención de la distribución tensional en el entorno de una cavidad circular.....	38

Figura N° 17: Principales direcciones de esfuerzos en un túnel horizontal, el esfuerzo horizontal es tres veces el esfuerzo vertical.....	39
Figura N° 18: Ilustración de la Teoría de Elasticidad.....	40
Figura N° 19: Sistema Matricial de la Teoría de Hooke Lineal.....	41
Figura N° 20: Ecuación Generalizada de Hooke 3D.....	41
Figura N° 21: Sistema Matricial de la Teoría de Hooke 3D.....	42
Figura N° 22: Discretización de un Túnel por elementos finitos.....	43
Figura N° 23: Unidades litoestratigráficas, al portal de salida del túnel Chacahuaro II.....	49
Figura N° 24: Mapa Geológico Local, de toda la variante Chacahuaro II.....	50
Figura N° 25: Unidad de laderas, mostrando el quiebre vertical muy abrupto.....	51
Figura N° 26: Cono de Deyección, escombros en el portal - túnel Chacahuaro II.....	52
Figura N° 27: Terrazas Fluvio-Torrenciales, depositadas en el portal - túnel Chacahuaro II.....	52
Figura N° 28: Proyección estereográfica y densidad de polos.....	54
Figura N° 29: Mapa geológico Estructural local, del área de estudio.....	55
Figura N° 30: Modelo geológico, perfil longitudinal del área de estudio.....	59
Figura N° 31: a) Sección 80+445, tipo de roca clase III. b) Sección 80+450, roca clase IV.....	60
Figura N° 32: Progresiva 80+455, tipo de roca clase III.....	60
Figura N° 33: Diagrama de flujo FEM.....	66
Figura N° 34: Condición de contorno y discretización.....	68
Figura N° 35: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).....	70
Figura N° 36: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).....	70
Figura N° 37: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).....	71

Figura N° 38: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo III. Con cargas de hasta 1,60 Mpa en los hastiales.....	72
Figura N° 39: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 1,60 Mpa en los hastiales.....	73
Figura N° 40: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 1,2 Mpa en los hastiales.....	73
Figura N° 41: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo III. Con cargas de hasta 0,09 Mpa en la bóveda.....	74
Figura N° 42: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 0,09 Mpa en la bóveda.....	75
Figura N° 43: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 0,06 Mpa en la bóveda.....	75
Figura N° 44: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo III. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.....	76
Figura N° 45: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo IV. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.....	77
Figura N° 46: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo IV. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.....	77

Figura N° 47: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo III.....	79
Figura N° 48: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo IV.....	79
Figura N° 49: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo IV.....	80
Figura N° 50: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II ,roca tipo III.....	81
Figura N° 51: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II ,roca tipo IV.....	81
Figura N° 52: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II ,roca tipo IV.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 01: Parámetros de clasificación del RMR.....	13
Tabla N° 02: Clases de macizo rocoso y sus índices RMR.....	14
Tabla N° 03: Clases de la calidad de la roca e índices RQD.....	14
Tabla N° 04: Tabla de determinación GSI.....	16
Tabla N° 05: Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial con la picota geotécnica normada.....	21
Tabla N° 06: Valores de la constante “mi”, de la roca intacta para distintos tipos de roca.....	21
Tabla N° 07: Clasificación de los métodos numéricos adaptada.....	34
Tabla N° 08: Familia de discontinuidades identificadas en el portal d salida del Túnel Chacahuaro II.....	55
Tabla N° 09: Evaluación de calidad del macizo rocoso.....	63
Tabla N° 10: Esfuerzos verticales - horizontales y profundidad bajo superficie....	64
Tabla N° 11: Propiedades elásticas y de resistencia del macizo rocoso.....	65

ABSTRACT

To make an assessment of the tenso-deformational analysis of a rock mass, it is necessary to know the resistance properties of the rock mass, elastic properties, kinematics, the in-situ efforts, the geometry of the excavation and the discontinuities. Supported by measurements by instrumentation of deformations (convergences and divergences).

The underground excavations involve the alteration of the initial efforts that were in equilibrium. Reason that confers to him to make an analysis of tensions and deformations, with the purpose of establishing a balance, to the new field of efforts and deformations, in the exit portal - Tunnel Chacahuaro II.

The application of the finite element is a useful computational calculation tool, which allows to obtain the maximum tensile-deforming stresses, breakage mechanisms, the safety factor in rocky massifs subject to underground excavation, as well as to locate plastification zones conditioned by discontinuities (faults, fractures).

RESUMEN

Para realizar una evaluación del análisis tenso-deformacional de un macizo rocoso, se requiere conocer las propiedades de resistencia del macizo rocoso, propiedades elásticas, cinemáticas, los esfuerzos in-situ, la geometría de la excavación y de las discontinuidades. Apoyada de mediciones por instrumentación de las deformaciones (convergencias y divergencias).

Las excavaciones subterráneas, implican la alteración de los esfuerzos iniciales que estaban en equilibrio. Razón que le confiere hacer un análisis de tensiones y deformaciones, con el fin de establecer un equilibrio, al nuevo campo de esfuerzos y deformaciones, en el portal de salida – Túnel Chacahuaro II.

La aplicación del método de elemento finito, es una herramienta útil de cálculo computacional, que permite obtener los esfuerzos tenso-deformantes máximos, mecanismos de rotura, el factor de seguridad en macizos rocosos sujetos a excavación subterránea, así también ubicar zonas de plastificación condicionado por discontinuidades (fallas, fracturas).

INTRODUCCIÓN

El análisis tenso-deformacional del macizo rocoso es un cálculo, que permite conocer los esfuerzos que actúan sobre las masas rocosas determinando modelos de deformación que adoptan un comportamiento elástico, elástico-frágil, elástico-plástico y la denominada pérdida de resistencia por deformación (strain-softening). Los parámetros geomecánicos que establecen el análisis tenso-deformacional del macizo rocoso, son la cohesión (C), el ángulo de fricción (ϕ), el módulo de deformación (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

La aplicación del método de elemento finito, permite el análisis paramétrico de propiedades elásticas y de resistencia de la roca, obtención de tensiones y deformaciones, previsión de los mecanismos de rotura, análisis de estabilidad en función de modelos constitutivos. (Rodríguez et al., 2014).

En el método de elemento finito, en los macizos rocosos pueden ser considerados como un medio discontinuo o un medio continuo. Para un medio discontinuo como es un macizo rocoso con múltiples sistemas de fracturamiento, la masa de roca es representada como un ensamble de distintos cuerpos interactuando entre ellos, los que a su vez son subdivididos en una malla de elementos finitos, lo que permite ser representado bajo las leyes de esfuerzo-deformación. (Rodríguez et al., 2014).

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La carretera central, está ubicada en una zona de riesgo por inundación en épocas de avenida del río Rímac, principalmente en el sector de Chacahuaro; por esta razón se tuvo que construir un túnel, para evitar de poner en riesgo los materiales y vidas humanas, en este tramo de la carretera.

Durante las excavaciones subterráneas, en el portal de salida del túnel, se produjeron derrumbes afectado por un conjunto de fracturas paralelas al eje del túnel, lo que implicó la inestabilidad durante el proceso constructivo.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿Mediante el análisis tenso-deformacional del macizo rocoso, se podrá determinar el grado de afectación de las fracturas paralelas al eje del portal de salida - túnel Chacahuaro II?

1.1.2. PROBLEMA ESPECÍFICO

- ¿Cómo afectan las fracturas paralelas al eje del portal de salida del túnel?

1.2. HIPÓTESIS PLANTEADA

1.2.1. HIPÓTESIS GENERAL

Mediante un análisis tenso-deformacional del macizo rocoso en el portal de salida del túnel Chacahuaro II, se podrá determinar las zonas de plastificación que están condicionadas por las fracturas paralelas al eje del portal de salida – Túnel Chacahuaro II, lo cual ha generado el colapso de este sector.

1.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO

Las fracturas paralelas al eje del portal de salida del túnel; condicionan la existencia de zonas de plastificación.

1.2.3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación, muestra el análisis tenso-deformacional en el portal de salida – Túnel Chacahuaro II, como una herramienta útil, para el análisis de estabilidad en excavaciones subterráneas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis tenso-deformacional del macizo rocoso afectado por fracturas paralelas en el eje del portal de salida - túnel Chacahuaro II, para determinar zonas de plastificación.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar Geomorfológica y Geológicamente el portal de salida del túnel Chacahuaro II.
- Determinar los parámetros geomecánicos que establecerán el análisis tenso-deformacional del macizo rocoso.
- Determinar la afectación de las fracturas paralelas al eje del portal de salida - túnel Chacahuaro II.

1.4. ANTECEDENTES

GEOINSTRUMENT S.A.C. Consultora de Servicios de Geofísica 2011, realizó el estudio de Refracción Sísmica, a la “Variante Chacahuaro II”, donde este método indirecto proyectó los límites espaciales de las unidades litológicas insitu.

GEOTUNELES S.A.C. Consultora de Servicios de Ingeniería 2012, realizó el estudio definitivo de la “Variante Chacahuaro II”, donde obtuvo los detalles de las condiciones geológico-geotécnicas, proyectado para el diseño del proceso constructivo del portal de salida - Túnel Chacahuaro II.

DEVIANDES S.A.C. Desarrollo Vial de los Andes 2015, realizó mejoramientos viales, aledaña de la “Variante Chacahuaro II”, donde obtuvo ensayos, diseños geotécnicos, que sirvió para, entender el modelo geológico de la zona y portal de salida - Túnel Chacahuaro II.

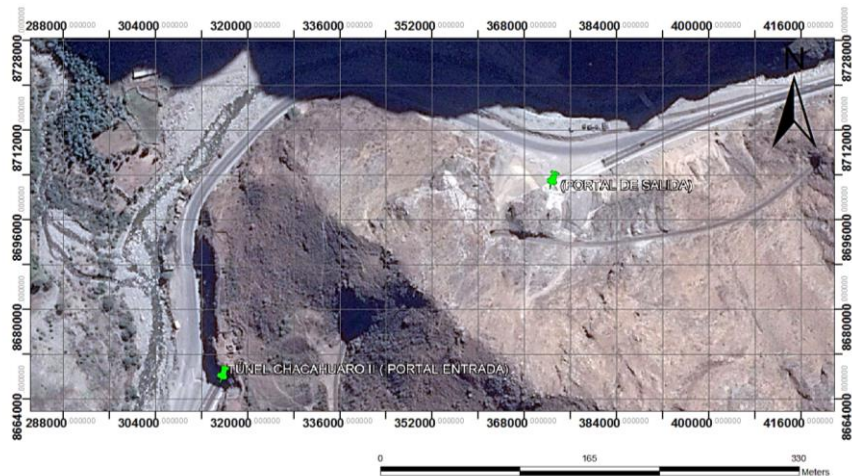
CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1.ASPECTOS GENERALES

2.1.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

Se encuentra ubicada en el flanco izquierdo del valle del río Rímac (aguas abajo), entre los Distritos de Matucana y San Mateo de la provincia de Huarochirí, de la región Lima, en las coordenadas UTM, WGS 84, Zona 18S: 352434E – 8693827N y 352693E – 8693985N, en la cota de 2555 m.s.n.m. El acceso a la zona se inicia, desde Lima partiendo de la Av. Ramiro Prialé vía pavimentada y continuar luego por .la Carretera Central en la Ruta (PE-022) hasta el Km 80+456. (*Ver Figura N°1*)



Fuente: (Google Earth)

Figura N° 01: Área de ubicación - Túnel Chacahuaro II.

2.1.2. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

La ejecución del túnel Chacahuaro II, es de suma importancia porque beneficiará directamente al desarrollo socioeconómico, por su grado de relevancia e integración con el resto del país, que son los departamentos de Lima y Junín, por otro lado también se estará solucionado de manera definitiva la pérdida de vidas humanas y daños materiales ocasionados por eventos extremos de fenómenos naturales (huaycos), que acontece en la Carretera Central, durante las épocas de máximas avenidas extraordinarias.

2.1.3. ASPECTOS CLIMÁTICOS

Por su ubicación la comunidad de Matucana se encuentra dentro de una zona que desciende de la Cordillera de los Andes, presentando un clima seco a templado. Las temperaturas medias alcanzan 22,2 °C a 13°C en otoño - invierno y 13°C a 25°C en primavera - verano. Las variaciones climáticas de los últimos años hacen recordar el carácter geodinámico, que labraron la génesis del valle a lo largo del cauce del Río Rímac, así mismo los taludes adyacentes. Fenómeno de El Niño con recurrencia de 4 años también son importantes en el modelamiento del terreno

y ponen en manifiesto muchas zonas de alto riesgo climático inherente en esta zona.

2.2.NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE EXCAVACIÓN (NATM)

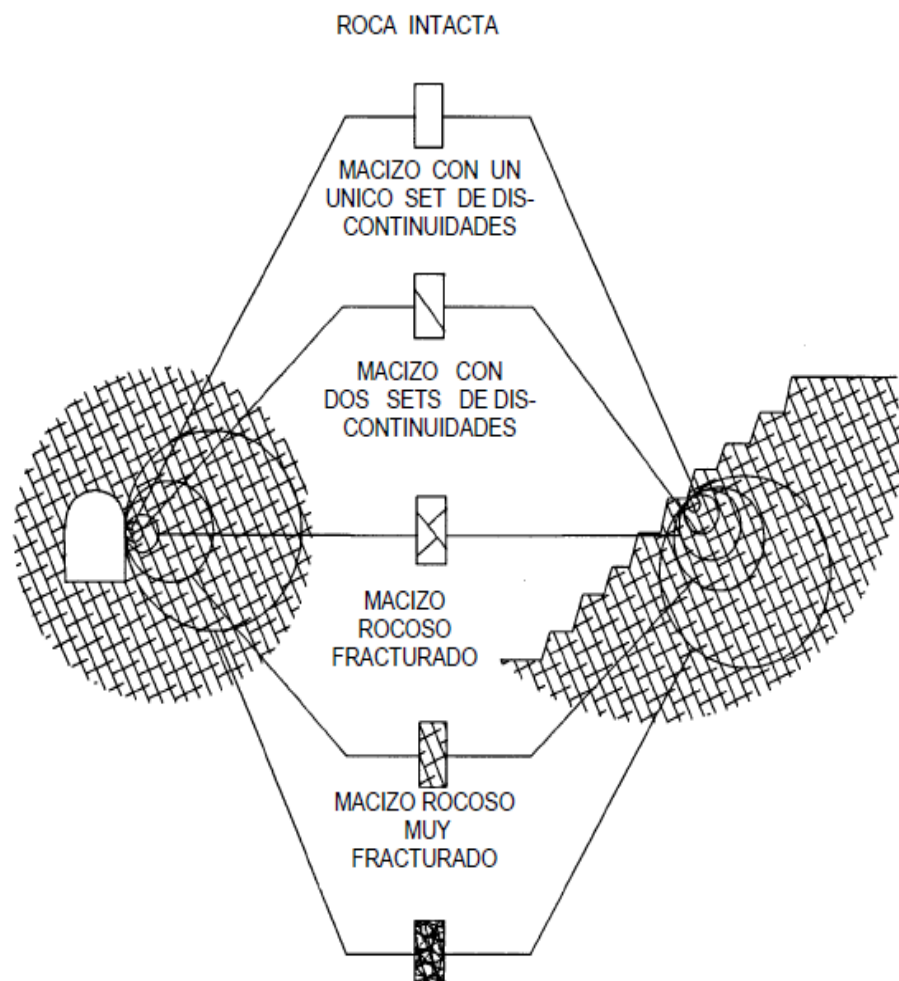
Está basado en la integración del terreno que rodea a la excavación en el anillo estructural autoportante formado entorno a la cavidad (tipo herradura), tal cual el terreno forma parte integrante de él. Se pretende relajar el estado tensional del macizo rocoso entorno al túnel, permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio en el que el sostenimiento controla dicha deformación, anclando éste al propio terreno. Todo esto se consigue mediante técnicas de auscultación y medida de convergencias, controlando así, en todo momento las deformaciones producidas y evitar que estas sean excesivas. (Fairhurts Rabcewicz, Leopold Müller & Franz Pacher ,1991).

El tamaño de la excavación, está condicionada a los macizos rocosos, los mismos que se encuentran fracturados y es muy raro el caso donde el espaciamiento entre discontinuidades es apreciablemente más grande que las dimensiones de un proyecto de excavación. En general, la estabilidad de una excavación cumple con las siguientes relaciones:

- Estabilidad = $1/N^{\circ}$ de discontinuidades
- Estabilidad = $1/\text{tamaño de la excavación}$

A medida que aumenta de tamaño la excavación, en un mismo macizo rocoso, aumenta el número de bloques y/o cuñas potenciales a fallar.

(Ver Figura N°2)



Fuente: (Hoek & Brown, 1997)

Figura N° 02: Diagrama de transición desde condición de roca intacta a macizo rocoso muy fracturado.

En esencia esta consiste de algunos principios básicos:

- Utilizar el propio macizo como elemento resistente frente a los incrementos locales de tensión producidos durante la excavación.

- Maximizar la resistencia inherente del macizo rocoso permitiendo su deformación, de tal manera que la roca sea su propio soporte.
- Aplicación de una membrana fina de shotcrete para prevenir mayor deformación de la roca.
- Medición y seguimiento sistemático de movimientos en el túnel, para adecuar las posibles medidas de apoyo adicionales requeridas. Instrumentación de las deformaciones en función del tiempo, con ayuda de clasificaciones geomecánicas y ensayos de laboratorio.
- Apoyo flexible, con soportes ‘activos’ que combinan shotcrete con barras de acero, mallas electrosoldadas y marcos de acero.

2.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICAS

La geomecánica es quizás una de las ramas tecnológicas más antiguas del universo, los Incas, egipcios y otras civilizaciones, emplearon a los macizos rocosos para obras.

Sin embargo la geomecánica como ciencia es a fines de los años 1950. Históricamente se conoce que el Primer Congreso de Mecánica de Rocas se celebró en Portugal en 1966 (López et al., 1998).

Las obras de ingeniería en rocas tanto subterránea como superficial, requiere del conocimiento adecuado del macizo rocoso, con este fin en la actualidad existen muchas clasificaciones geomecánicas que pueden ser empleados, como: Bieniawski, Laubscher & Taylor, Barton,

Romana, GSI, etc. que ayudan a determinar el tipo y calidad del macizo rocoso, con la finalidad de dividir al macizo rocoso en dominios estructurales, cada uno de ellos tendrán características similares, como: Litología, espaciado de discontinuidades, entre otros. Los límites de un dominio estructural pueden coincidir con rasgos geológicos, tales como fallas, diques y diaclasas. En esta investigación se tomaran en cuenta los sistemas de clasificación RMR (Bieniawski, 1976), Q (Barton) y GSI.

2.3.1. ROCK MASS RATING (RMR), BIENIASWSKI, 1989.

Esta clasificación fue introducida por Bieniawski originalmente en 1976, sufriendo modificaciones y ampliada hasta obtenerse la definitiva en 1989. Su aplicación no tiene limitaciones, excepto en rocas expansivas y fluyentes que no da buenos resultados.

El parámetro que define la clasificación es el denominado RMR que se obtiene de la cuantificación numérica de la calidad mecánica del macizo rocoso a partir de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión simple (UC) de la roca intacta.
- Índice de calidad de la roca RQD.
- Espaciamiento entre las discontinuidades.

- Condición de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades.

Estos factores mencionados se cuantifican mediante una serie de parámetros definiéndose unos valores para dichos parámetros, cuya suma, en cada caso nos da el índice de calidad del RMR que varía entre 0 a 100.

Los objetivos de esta clasificación son:

- Determinar y/o estimar la calidad del macizo rocoso.
- Dividir el macizo rocoso en grupos según su calidad.
- Proporcionar una buena base de entendimiento de las características del macizo rocoso.
- Facilitar la planificación y el diseño de estructuras en roca, proporcionando datos cuantitativos necesarios para la solución real de los problemas de ingeniería.

➤ **Tabla N° 01: Parámetros de clasificación del RMR.**

Parámetros de clasificación	Parámetros	Rango de Valores
Resistencia Uniaxial de la roca intacta	A1	0 - 15
Rock Quality Designation (RQD)	A2	3 - 20
Espaciamiento de discontinuidades	A3	5 - 20
Condición de las discontinuidades	A4	0 - 30
Condiciones hidrogeológicas, agua subterránea	A5	0 - 15
Ajuste por orientación de discontinuidades	B	(-12) - 0

Fuente: (Bieniawski, 1976)

➤ **Tabla N° 02: Clases de macizo rocoso y sus índices RMR.**

Índice RMR	Clase	Calidad del macizo rocoso
81 - 100	I	Roca muy buena
61 - 80	II	Roca buena
41 - 60	III	Roca regular
21 - 40	IV	Roca mala
< 20	V	Roca muy mala

Fuente: (Bieniawski ,1989)

2.3.2. INDICE DE DESIGNACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA (RQD)

Este sistema de clasificación fue introducido por (Deere, 1967) basado en la utilización del índice de calidad RQD (Rock Quality Designation), este parámetro se obtiene a partir de las juntas (J_v), que indica el número de juntas por m^3 , observadas en el afloramiento del macizo rocoso; permitiendo estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. $RQD = 115 - 3,3x J_v$

Según este índice de calidad se clasifican los macizos en 6 clases y se proponen los distintos tipos de sostenimiento a utilizar en función de la clase del macizo rocoso del método de excavación utilizado, como se observa en la siguiente tabla.

➤ **Tabla N° 03: Clases de la calidad de la roca e índices RQD.**

RQD	RQD > 90	75 < RQD < 90	50 < RQD < 75	25 < RQD < 50	RQD < 25	Fuente o Expansiva
Calidad de la roca	Excelente	Buena	Regular	Mala	Muy Mala	Extremadamente Mala

Fuente: (Deere ,1963)

2.3.3. CRITERIO MODIFICADO DE MARINO & HOEK - BROWN, 2000.

El índice de resistencia geológica, GSI, fue estimado por (Hoek et al., 1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR₈₉ para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos. La resistencia de la masa rocosa diaclasada depende de las propiedades de los trozos de roca intacta y de la libertad que tengan estos de deslizarse y rotar bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Esta libertad está controlada por la forma geométrica de los trozos de roca intacta y por las condiciones de las superficies que las separan. Trozos angulares de roca con superficies de discontinuidad limpia y rugosa, imprimen a la masa rocosa una mayor resistencia que aquella que contenga partículas redondeadas de material alterado y meteorizado.

El sistema de clasificación GSI grandemente respeta las restricciones geológicas que ocurren en la naturaleza y están reflejadas en la información geológica.

El sistema GSI se basa en la descripción de dos factores: la estructura del macizo rocoso que esta expresada por el grado de fracturamiento y las características intrínsecas de las discontinuidades.

➤ **Tabla N° 04: Tabla de determinación GSI.**

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOSO FRACTURADOS (Marinos & Hoek (2000)) Estime el valor tipico de <i>GSI</i> considerando el tipo de roca, la estructura del macizo rocoso, y la condición de las discontinuidades. NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que considerar $GSI = 35$. Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural. Si hay estructuras desfavorablemente orientadas, ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i> . La presión del agua no se considera al evaluar el rango de <i>GSI</i> ; ya que la misma se incorpora posteriormente en los análisis geotécnicos, los que se desarrollan considerando esfuerzos efectivos.		CONDICION DE LAS ESTRUCTURAS				
		MUY BUENA Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas	BUENA Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas.	REGULAR Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas	MALA Pulidas, cajas meteorizadas, con patinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos	MUY MALA Pulidas, cajas muy meteorizadas, con patinas o con rellenos de arcilla blanda
ESTRUCTURA DEL MACIZO		DISMINUYE LA CALIDAD →				
INTACTA o MASIVA Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.	90			N/A	N/A	
BLOCOSA Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre si.	80			50	40	
MUY BLOCOSA Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.	70				30	
BLOCOSA VETEADA Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes.	60				20	
DESINTEGRADA Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.					10	
LAMINADA / CIZALLADA Macizo con planos débiles (cizalle y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques.		N/A	N/A			

Fuente: (Marinos & Hoek ,2000)

Este criterio toma en consideración la resistencia de la roca

intacta y las constantes m_b , s y a , parámetros que se estiman en

función de la estructura y la condición de las discontinuidades del macizo rocoso, representado por el índice de resistencia geológica GSI. La forma generalizada del criterio de falla de Hoek – Brown es:

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

Dónde:

- m_b , s y a son parámetros que dependen de las características del macizo rocoso y cuyo cálculo se detalla más adelante.
- σ_{ci} es la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
- σ'_1 , σ'_3 son los esfuerzos efectivos axial y de confinamiento principales respectivamente.

Los parámetros m_b , s y a , se calculan mediante las siguientes fórmulas aplicables a macizos rocosos disturbados y no disturbados.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right); s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right);$$

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

Dónde:

- m_i es la constante de la roca intacta, estimada en el laboratorio mediante ensayos triaxiales.
- m_b es un valor reducido de la constante del m_i .
- s y a son constantes del macizo rocoso.
- GSI Índice resistencia geológica.
- D es un factor que depende del grado de alteración al que estará sujeto el macizo rocoso por efecto de la voladura y de la relajación de tensiones. Este factor varía desde 0 para macizos rocosos in-situ no alterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

La variable m_i de la fórmula anterior es la constante de la roca intacta, estimada en el laboratorio mediante ensayos triaxiales.

El módulo de deformación (E_m) del macizo rocoso ha sido estimado también a partir de los valores de calidad del macizo rocoso, de acuerdo con la fórmula empírica propuesta por E. Hoek y M.S. Diederichs (2005) que se consigna a continuación.

Los valores de E_m están dados en MPa.

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

2.4. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Los parámetros de resistencia de la roca intacta son fácilmente determinables mediante ensayos de laboratorio. En general, es reconocida la dificultad práctica y conceptual de obtener, estimar y definir estos parámetros de resistencia y deformación cuando se hace referencia al macizo rocoso, debido a su heterogeneidad, anisotropía y discontinuidad.

Las evidentes limitaciones de los criterios de resistencia-ruptura, como el de Mohr-Coulomb, que se basa en el uso de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}), la cohesión (c), y el ángulo de fricción de la roca intacta (ϕ), al tratar de usarlo en los macizos rocosos fue poco práctico, ya que acentuaban las fallas de este criterio, debido a que los parámetros que controlan el comportamiento de los mismos no se limitan a los planos de discontinuidad, resistencias a la compresión uniaxial o al corte, sino dependen de la resistencia global del conjunto que constituyen los materiales rocosos del macizo, tales como los rellenos, la geometría, las discontinuidades, etc.

(Evert Hoek, 1994), publicó un artículo ‘Strength of Rock Masses’, en donde introdujo el índice de resistencia geológica (GSI). El índice, al ser de carácter intrínseco, le permitió al autor proponerlo como

herramienta para estimar y cuantificar numéricamente los principales características geomecánicas de los macizos rocosos.

El GSI provee un sistema para estimar la reducción de la resistencia y el aumento de la deformabilidad de las rocas que se producen al pasar de la caracterización de la roca intacta en laboratorio, a los macizos rocosos sobre los cuales se realizan las obras de ingeniería.

Según (Barton & Bandis, 1982), resistencia al corte de las discontinuidades:

$$\tau = \sigma n \tan [JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma n} \right) + \phi_b]$$

2.5.TENSO-DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

2.5.1. TENSIÓN Y DEFORMACIÓN DE LA ROCA INTACTA.

Las propiedades de tensión y deformación de la roca intacta, provienen del resultado de sus propiedades físicas y mecánicas. La gran variabilidad de estas propiedades se refleja en los comportamientos mecánicos diferentes frente a los esfuerzos insitu o generados a la roca, comportamientos que quedan definidos por la resistencia del material y por su modelo de deformación; así como una caliza se comporta de forma plástica frente a elevadas cargas y dúctil a esfuerzos moderados o bajos. Será por tanto sus propiedades físicas las que determinen su comportamiento mecánico (Vallejo et al., 2002).

➤ **Tabla N° 05: Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial con la picota geotécnica normada.**

Clase (a)	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy Resistente	100 – 250	4 – 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, trolita, toba.
R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente Resistente	25 – 50	1 – 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrarla roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5 – 25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy Débil	1 – 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0,25 – 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Sabanda arcillosa dura.

(a) Clases según Brown [2].

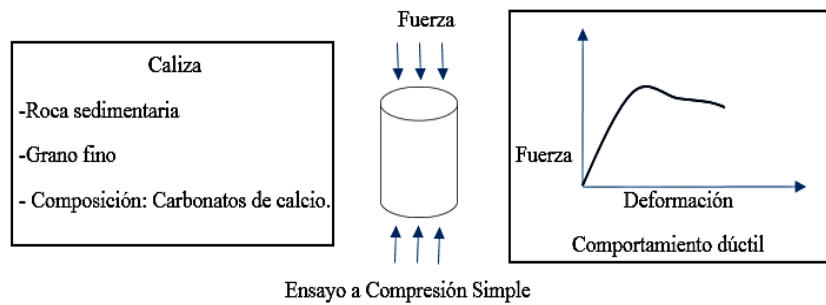
(b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 MPa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

Fuente: (Hoek & Brown, 1980)

➤ **Tabla N° 06: Valores de la constante m_i , de la roca intacta para distintos tipos de roca.**

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
	No Clásticas	Orgánicas	← Grauwaca (18) → ← Creta (7) → ← Carbón (8 – 21) →			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
		Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13	
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 – 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
		Oscuras	Granodiorita (30)		Dacita (17)	
	Extrusivas Piroclásticas		Diorita (28)	Dolerita (19)	Andesita 19	
		Gabbro 27		Basalto (17)		
		Norita 22				
		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)		

Fuente: (Hoek & Brown, 1980)



Fuente: (Vallejo, 2002)

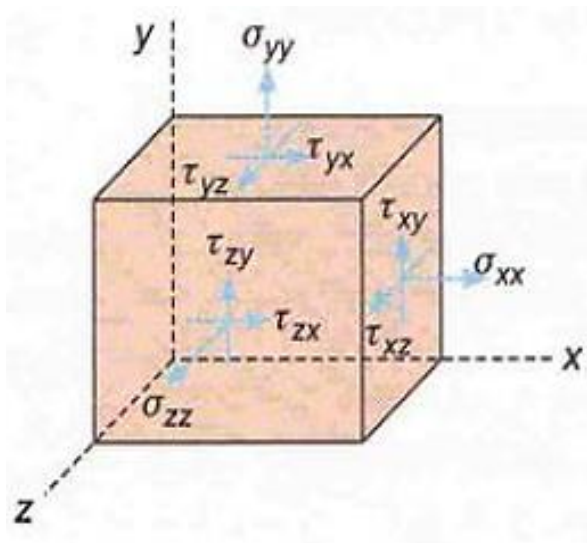
Figura N° 03: Diagrama de propiedades físicas y mecánicas de roca intacta.

2.5.2. TENSIÓN DEL MACIZO ROCOSO.

Son fuerzas, que no pueden ser medidas directamente más, apenas pueden ser obtenidas por el análisis de sus efectos, en términos de las deformaciones resultantes o por medio de rupturas de cuerpos sólidos. El término tensión envuelve básicamente dos conceptos: tensión en un plano y en un punto. El primero define la tensión como la fuerza por unidad de área para un elemento dado de un plano considerado, siendo expresado por dos componentes: la tensión normal (compresiva o distensión) y la tensión cizallante de corte. (Stephansson et al., 1997).

Las tensiones iniciales en el interior de un macizo rocoso, están producidas por las fuerzas exteriores aplicadas y por el peso propio del material. El estado de esfuerzos en un punto queda definido por el tensor de esfuerzos, el mismo que queda definido

por nueve componentes de esfuerzos independientes, 3 normales y 6 tangenciales. (Steven et al., 2010)



Fuente: (Steven, 2010)

Figura N° 04: Tensiones en 3 dimensiones.

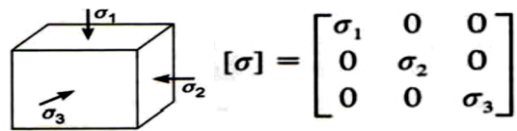
Si se considera el equilibrio del cubo de la figura 03, debe cumplirse que:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \text{y} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

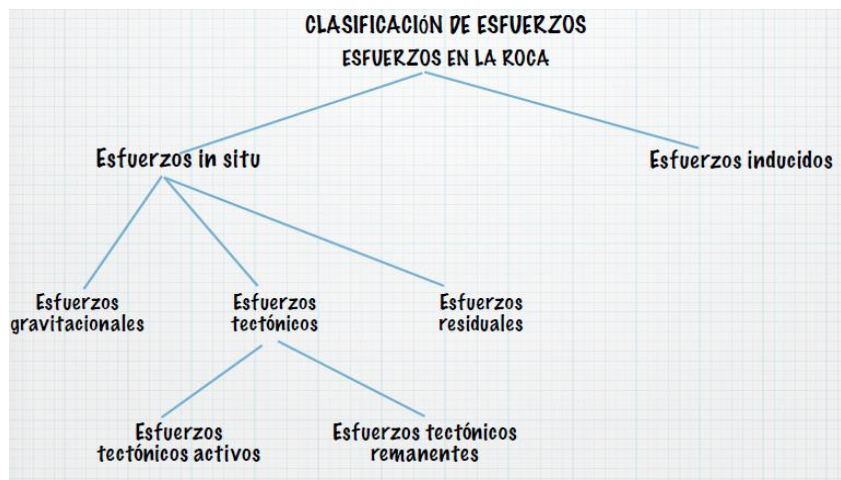
Por lo que únicamente son necesarios seis componentes de esfuerzo para conocer el estado de esfuerzos en un punto:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

El tensor de esfuerzos correspondiente a los esfuerzos principales es:



La corteza terrestre está sometida a distintos tipos de esfuerzos, la que obedece a distintas causas. (*Ver Figura N°05*).



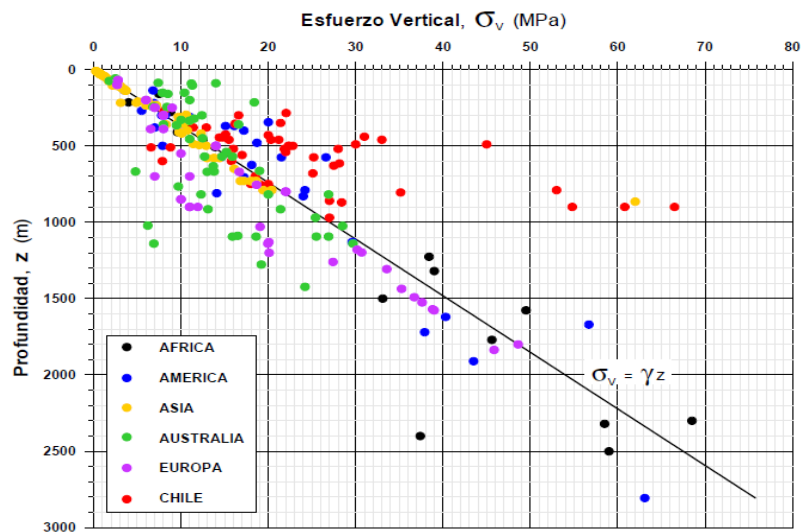
Fuente: (Stephansson, 1997)

Figura N° 05: Clasificación de esfuerzos en la roca.

Las tensiones inducidas son las que se generan como consecuencia de la modificación o redistribución del estado de esfuerzos natural debido a la perturbación de los macizos con la implementación de obras de ingeniería. Este aspecto es de gran importancia en el diseño y construcción de excavaciones subterráneas. El estado de tensión natural resulta de los sucesivos eventos de la historia geológica actuantes sobre un determinado macizo rocoso, correspondiendo por tanto, al producto de varios estados sucesivos de tensiones. Asimismo, la

tensión natural es resultado de los efectos del peso propio de los estratos subyacentes a un punto considerado del macizo y a la evolución de la historia geológica. (Stephansson et al., 1997)

El estado de tensión en el macizo rocoso, generalmente, se considera con bastante aproximación que el esfuerzo vertical in situ en una excavación subterránea está dado por el producto del peso unitario del macizo rocoso por la profundidad de la excavación. (Ver Figura N°06)

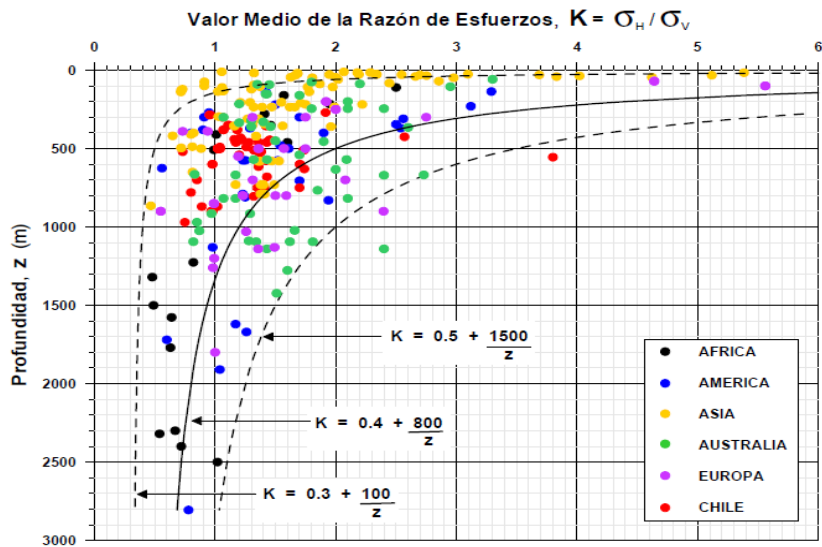


Fuente: (Hoek & Brown, 1997)

Figura N° 06: Vaciado de esfuerzos verticales contra la profundidad bajo la superficie.

El esfuerzo horizontal in situ, por otro lado, depende de factores más complejos, tales como el tectonismos de la zona, la topografía superficial, la presencia de fallas y otros elementos estructurales en las cercanías, etc. Usualmente, el esfuerzo

horizontal in situ se representa como un valor proporcional al esfuerzo vertical in situ, y a la relación entre ambos (esfuerzo horizontal / esfuerzo vertical) al que se denomina K.



Fuente: (Hoek & Brown, 1997)

Figura N° 07: variación de la relación de esfuerzo horizontal medio al esfuerzo vertical con la profundidad bajo la superficie.

Según (Sheory, 1994) tipos de túneles de acuerdo a la constante, $K < 1$ es tipo baúl, $K = 1$ circular, $K > 1$ es tipo herradura, también se puede determinar con las siguientes fórmulas ($600\text{m} > K > 600\text{m}$):

$$K = 0.25 + 7Eh \left(0.001 + \frac{1}{Z}\right) \quad ; \quad k = 0.40 + \frac{800}{Z}$$

Z = Profundidad bajo la superficie en metros, Eh = Módulo de deformación horizontal promedio de la masa rocosa de la superficie (GPa).

2.5.3. DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO.

Se entiende la deformación como un cambio de forma, orientación, volumen y posición, causada por las tensiones actuantes, correspondiendo asimismo, a la respuesta mecánica compleja de los materiales a las tensiones aplicadas en el medio, durante un determinado período de tiempo.

Según (Donald, 2009) & (Haakon, 2010), cuando la deformación inducida a un volumen de roca es la misma en toda su extensión, la deformación es homogénea. La rotación rígida y la traslación son, por definición, homogéneas; por tanto, solamente la deformación interna y las variaciones de volumen pueden ser heterogéneas. En la deformación homogénea, líneas originalmente rectas y paralelas (esquistosidad, bandeamiento, foliaciones, etc) continúan como tales después de la deformación.

Según (Young, 1802), módulo de elasticidad (E) es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. El término módulo es el diminutivo del término latino *modus* que significa "medida".

Según (Poisson, 1827), coeficiente de Poisson (ν) es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.

Según (Hoek & Diederichs, 2006), la deformación para macizos rocosos:

$$\sigma_{ci} < 100 \text{ Mpa} \rightarrow \text{Erm(GPa)} = (1 - 1/2) \left(\frac{\sqrt{\sigma_{ci}}}{100} \right) 10^{\left(\frac{GSI-10}{40} \right)}$$

$$\sigma_{ci} > 100 \text{ Mpa} \rightarrow \text{Erm(GPa)} = (1 - 1/2) 10^{\left(\frac{GSI-10}{40} \right)}$$

2.6. MÉTODO NUMÉRICO POR ELEMENTOS FINITOS

Arquímedes (287-212 a.C.) empleaba el mismo método para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o la superficie de áreas. En oriente también aparecen métodos de aproximación para realizar cálculos. Así el matemático chino Lui Hui (300 d.C.) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular longitudes de circunferencias con lo que conseguía una aproximación al número Pi de 3.1416.

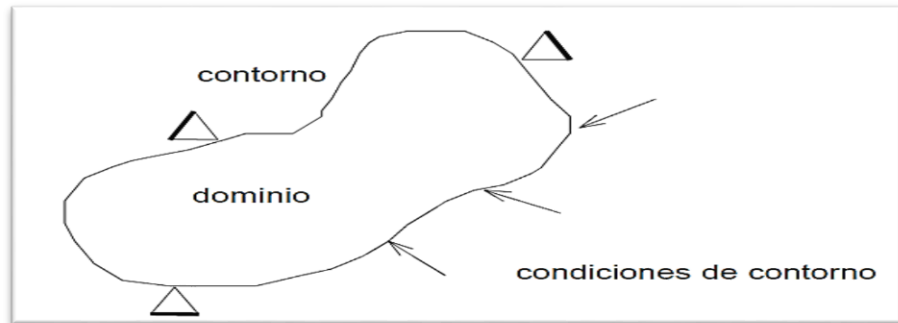
Aunque el nombre del MEF se ha establecido recientemente, el concepto se ha usado desde hace varios siglos. El concepto de ‘elementos finitos’ parte de esa idea. Para encontrar vestigios de este

tipo de cálculos podríamos remontarnos a la época de la construcción de las pirámides egipcias. Los egipcios empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. (Cubo et al., 2010).

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. (Chapra et al., 2006).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre: Dominio. Espacio geométrico donde se analiza el sistema. Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos.

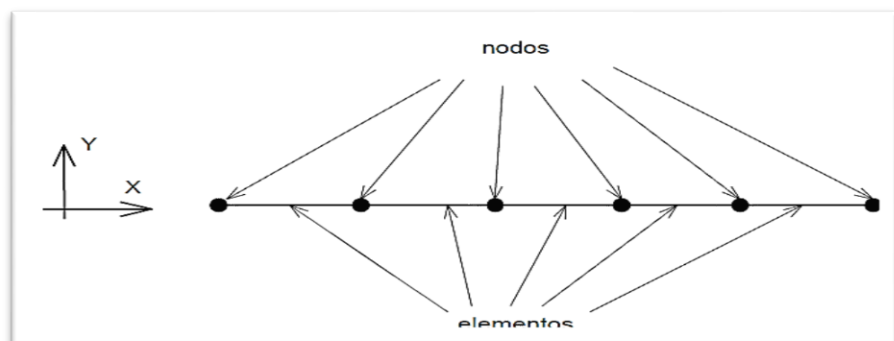
Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones.



Fuente: (Cubo, 2010)

Figura N° 08: Ilustración de los parámetros del MEF.

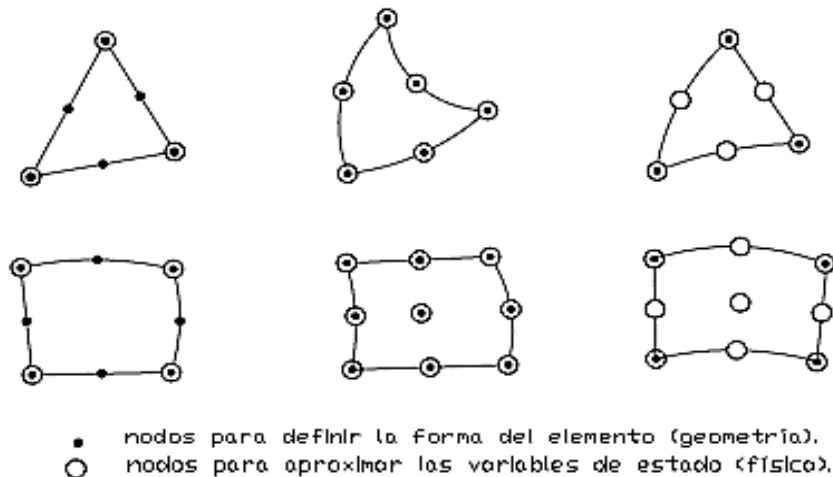
El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies, o volúmenes (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los grados de libertad de cada nodo serán: Desplazamiento en dirección x , desplazamiento en dirección y y giro según z . (Chapra et al., 2006).



Fuente: (Chapra & Canale 2006)

Figura N° 09: Ilustración de los elementos del MEF Lineal.

En el análisis bidimensional (elemento plano o de lados rectos - macizo rocoso), las coordenadas de los nodos primarios definirán la forma exacta del mismo. Debido a esto, la discretización del dominio muchas veces se realiza mediante elementos de lados rectos. El dominio, se dividida en elementos que pueden ser triangulares, rectangulares o regiones de cuatro lados, los que pueden ser rectos o curvos, para algunos problemas estos elementos, pueden producir errores inaceptables y la discretización debe ser realizada con elementos de orden superior. (Ver Figura N°10).

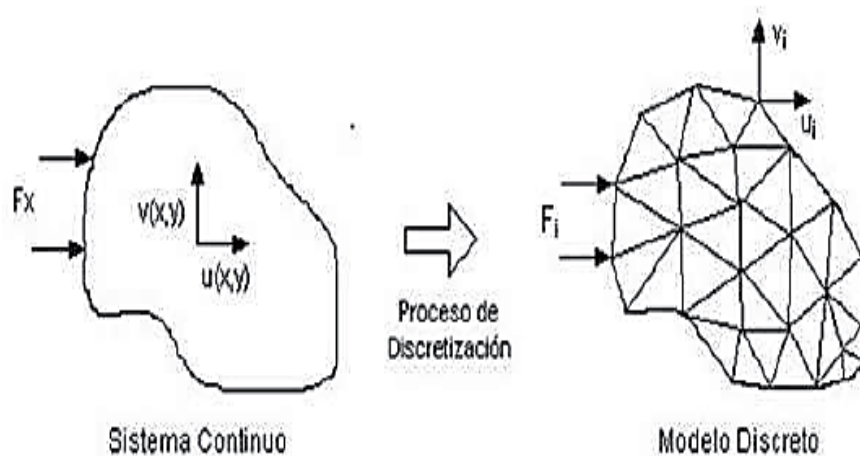


Fuente: (Chapra & Canale 2006)

Figura N° 10: Elementos finitos sub paramétricos, isoparamétricos superparamétricos.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. (Chapra et al., 2006).

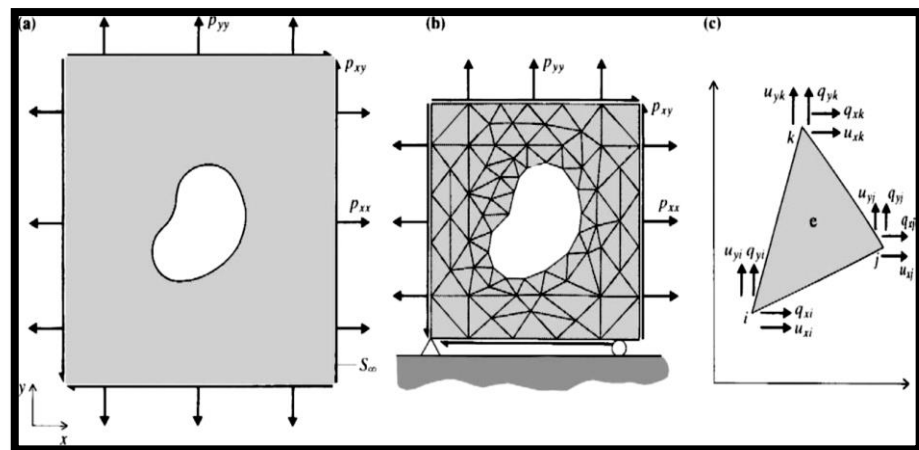
El método de los elementos finitos, se trata de un método para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. Las propiedades materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las "esquinas" de los elementos o nodos. (Carnicero et al., 2001) (*Ver Figura N°11*).



Fuente: (Carnicero, 2001)

Figura N° 11: Esquema representativo del modelo continuo y del modelo discreto.

En la figura 12, se presenta el dominio del problema (para un medio continuo dotado de una abertura interna sometido a una determinada carga). Representa la discretización de este dominio, compuesta mediante elementos triangulares de tres puntos nodales, presenta en la cara libre una mayor densidad de elementos, una vez que la variación de tensiones y de deformación tiende a ser acentuada en esa región. Las condiciones de contorno del problema pueden ser impuestas como fuerzas de superficie o desplazamientos.



Fuente: (Brady & Brown ,1994)

Figura N° 12: Modelación numérica por Elementos Finitos.

La figura “C” representa un elemento individualizado, representando las componente de fuerzas y los desplazamientos nodales, en los puntos i,j,k.

El modelamiento numérico en la ingeniería de rocas, permite el cálculo del estado tensión-deformación. El método numérico es empleado desde dos ópticas como sistema continuo y como sistema discreto,

últimamente se han implementado los sistemas híbridos bajo diferentes modalidades. (Jing et al., 2002).

➤ **Tabla N° 07: Clasificación de los métodos numéricos adaptada.**

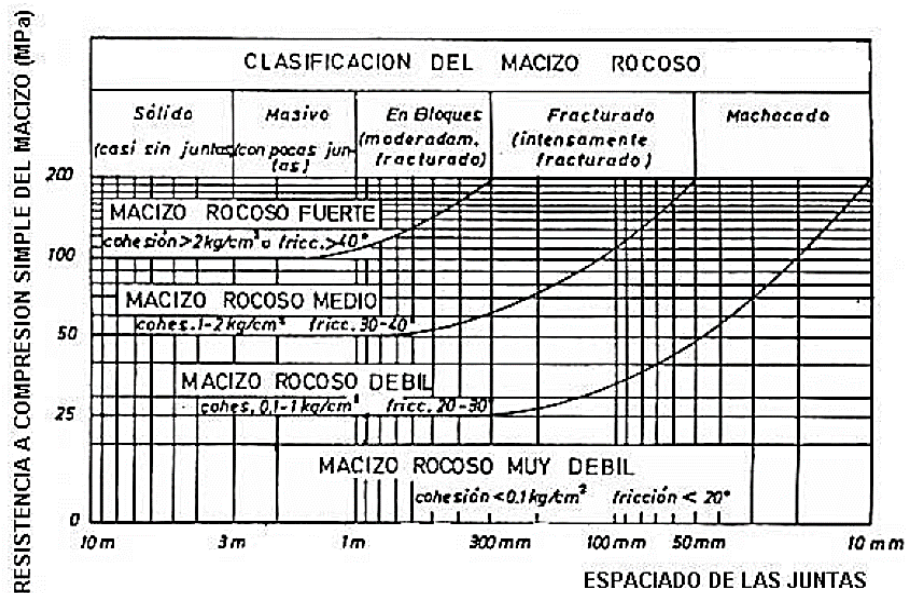
Sistema Continuo	Sistema discontinuo (discretos)	Hibrido continuo / discontinuo
<ul style="list-style-type: none"> - Diferencias finitas (FDM) - Elementos finitos (FEM) - Elementos de contorno (BEM) 	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos discretos (DEM) - Red de fracturas discretas (DFN) 	<ul style="list-style-type: none"> - FEM /BEM - DEM / DEM - DEM - Otros modelos híbridos

Fuente: (Jing ,2002)

La modelación numérica, por el método de elemento finito (MEF) predice de forma aproximada el comportamiento geomecánico de excavaciones subterráneas y superficiales en macizos rocosos, la que está condicionada a la exactitud de datos provenientes de campo y laboratorio. En el método de elemento finito, los macizos rocosos pueden ser considerados como un medio discontinuo o un medio continuo. Para un medio discontinuo como es un macizo rocoso con múltiples sistemas de fracturamiento, la masa de roca es representada como un ensamble de distintos cuerpos interactuando entre ellos, los que a su vez son subdivididos en una malla de elementos finitos, lo que permite ser representado bajo las leyes de esfuerzo-deformación. El comportamiento continuo se asocia a una aproximación de conectividad

y continuidad de los desplazamientos y esfuerzos entre los elementos, es decir hablamos de macizos rocosos masivos. (Rodríguez et al., 2014).

La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende de las propiedades de los trozos o bloques de roca intacta y, también, de la libertad de estos para deslizar y girar bajo distintas condiciones de esfuerzo. Esta libertad está controlada por el perfil geométrico de los trozos o bloques de roca intacta, así como también por la condición de las superficies que separan dichos trozos o bloques. La resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas. (Hoek et al., 1997). (Ver Figura N°13)



Fuente: (Bieniawski, 1976)

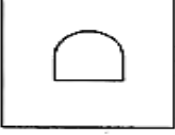
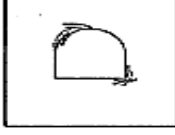




Figura N° 13: Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las juntas y de la resistencia a compresión de la roca.

Cada excavación subterránea, se proponen modelos de interacción para macizos de fortificación, factibles a utilizar para el diseño; se recomiendan en cada caso expresiones para el cálculo de la presión actuante en correspondencia con el modelo asumido.

Las excavaciones en rocas masivas a 200 m. de profundidad no sufren daños y por tanto no requieren refuerzo, excepto localmente o para satisfacer reglamentos de seguridad; a diferencia de rocas fisuradas asociada a bajos esfuerzos, normalmente se presentan desprendimientos y/ó deslizamientos de bloques menores debido principalmente a efectos gravitatorios. El anclaje con pernos es diseñado para soportar el peso muerto de las cuñas y/o bloques.

En rocas altamente fisuradas, se producen desprendimientos y/ó deslizamientos de pequeñas cuñas y/ó bloques formados por la intersección de las discontinuidades.

Este fenómeno puede continuar propagándose hasta formar grandes cavidades si no se adopta oportunamente un sistema de refuerzo. Distintos tipos de rotura (en general inestabilidades) que se pueden observar en una excavación subterránea. Según este diagrama la rotura de un macizo rocoso alrededor de una excavación depende básicamente del estado tensional in situ y de las características del macizo. (Hoek et al., 1995) (*Ver Figura N°14*)

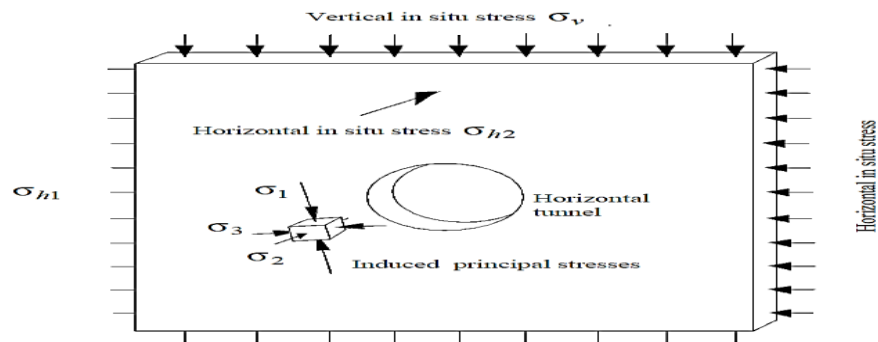
	Bajos niveles de tensión	Altos niveles de tensión
ROCA MASIVA		
	Respuesta elástica, sin presencia de roturas.	Pequeñas inestabilidades tipo escamas o roturas aparecen en los puntos de concentración de tensiones y se propagan hacia el macizo.
ROCA FRACTURADA		
	Eventuales caídas o deslizamientos de bloques o cuñas liberados por las discontinuidades.	Inestabilidades por deslizamiento de bloques o por subdivisión o rotura de bloques.
ROCA MUY FRACTURADA		
	La superficie del hueco se rompe por fenómenos de deslizamiento y caída de pequeños bloques y cuñas. La rotura puede propagarse bastante hacia el interior del macizo rocoso si no se controla.	La superficie del hueco se rompe por fenómenos de deslizamiento y rotura de elementos de roca. Se observa típicamente elevación de la solera e importantes convergencias entre hastiales.

Fuente: (Hoek, 1995)

Figura N° 14: Tipo de rotura en diferentes macizos rocosos bajo diferentes niveles de tensión.

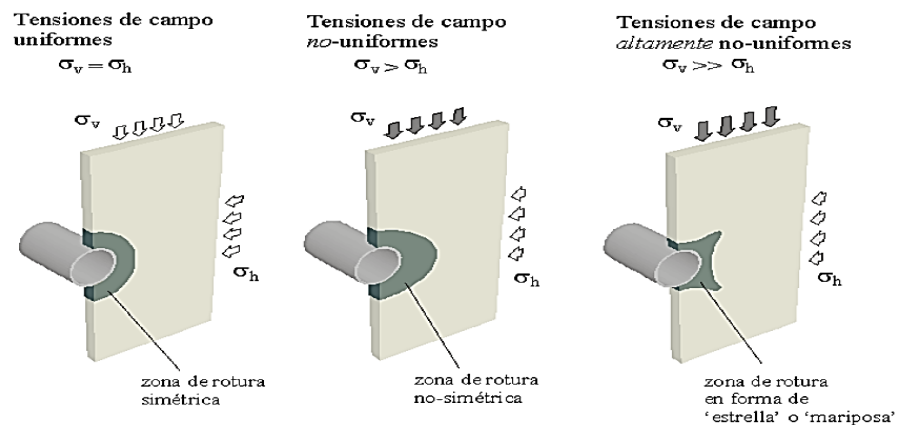
Causas que pueden originar la inestabilidad son 4 cuatro: (i) tensiones excesivas (de campo o inducidas), (ii) geología desfavorable, (iii) flujos de agua grandes y (iv) alteraciones desfavorables (hinchamiento y desmoronamiento). En cualquier caso, un factor importante en las excavaciones subterráneas es el estado tensional in situ, que siempre es afectado por la excavación, de forma que las tensiones principales se alteran tanto en magnitud como en dirección, siendo necesario establecer dónde se concentran las tensiones y si la tensión máxima alcanza la resistencia del macizo. (Hoek et al., 1980).

Para el caso de excavaciones circulares las zonas que sufren rotura tendrán una forma circular (para campos tensionales isótropos), elíptica (para el caso de campos tensionales anisótropos) o en forma de estrella o mariposa (cuando el campo tensional sea altamente anisótropo) (Ver **Figura N°15**)



Fuente: (Hoek, 2007)

Figura N° 15: Ilustración de esfuerzos principales inducidos en un túnel horizontal de forma circular.

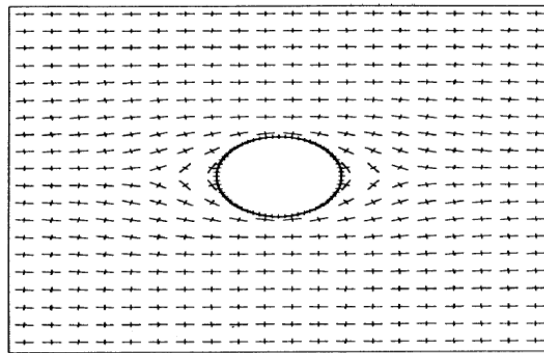


Fuente: (Carranza & Torres, 1999)

Figura N° 16: Definición de los valores tensionales y geométricos para la obtención de la distribución tensional en el entorno de una cavidad circular.

El problema de distribución de tensiones en el entorno de estos huecos fue presentado en un inicio por (Obert et al., 1967).

La distribución de tensiones depende de la relación entre el radio de curvatura de la esquina y la anchura del hueco r/W_0 . La máxima concentración de tensiones aumenta rápidamente a medida que este cociente disminuye por debajo $1/4$. (*Ver Figura N°17*).



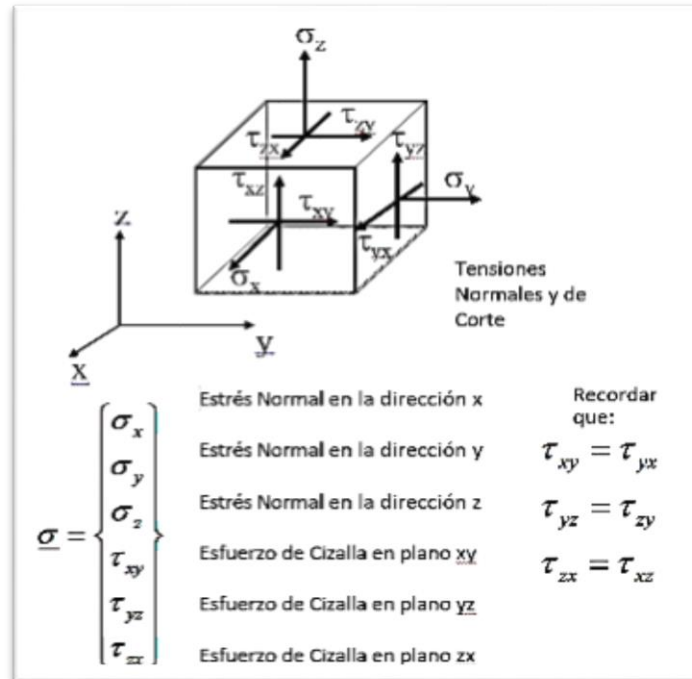
Fuente: (Hoek, 2007)

Figura N° 17: Principales direcciones de esfuerzos en un túnel horizontal, el esfuerzo horizontal es tres veces el esfuerzo vertical.

El proceso de análisis de un problema físico mediante elementos finitos se inicia con obtención de la geometría puede ser definida por el analista o creada a partir de algún programa CAD. El segundo paso consiste en definir el modelo matemático a resolver.

Este es el paso fundamental donde se especifica el tipo de ecuaciones a determinar, las condiciones de borde, propiedades materiales, y otros detalles acerca del método en sí mismo. Una vez efectuada dicha definición el programa PHASES, resuelve automáticamente las

ecuaciones pertinentes y provee los resultados en una forma apropiada para el analista.



Fuente: (Steven, 2010)

Figura N° 18: Ilustración de la Teoría de Elasticidad.

Para el caso elástico lineal, isotrópico (es decir, la rigidez es la misma en todas las direcciones), los esfuerzos se pueden relacionar a través de la ley de Hooke y el sistema de ecuaciones es solvente.

$$\underline{\sigma} = \underline{D} \underline{\varepsilon} \quad \text{Ley de Hooke Lineal; donde:}$$

σ = tensión del material [N/mm²]

ε = deformación [m/m]

E= módulo de elasticidad o de Young [N/mm²]

Esta versión de la ley de Hooke solo es aplicable a estados de tensión uniaxiales.

$$\underline{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Fuente: (Steven, 2010)

Figura N° 19: Sistema Matricial de la Teoría de Hooke Lineal.

Donde:

E = Módulo de Young o Módulo elástico

ν = relación de Poisson

Para el caso elástico no lineal, isotrópico (es decir, la rigidez es diferente en las direcciones x, y, z); las tensiones se pueden relacionar a través de la ley de Hooke Generalizada.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned}$$

Fuente: (Steven, 2010)

Figura N° 20: Ecuación Generalizada de Hooke 3D.

Elasticidad lineal + material isótropo:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & \frac{1}{E} & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

2 constantes elásticas independientes

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Fuente: (Steven, 2010)

Figura N° 21: Sistema Matricial de la Teoría de Hooke 3D.

Donde:

E = Módulo de Young o Módulo elástico

ν = Relación de Poisson

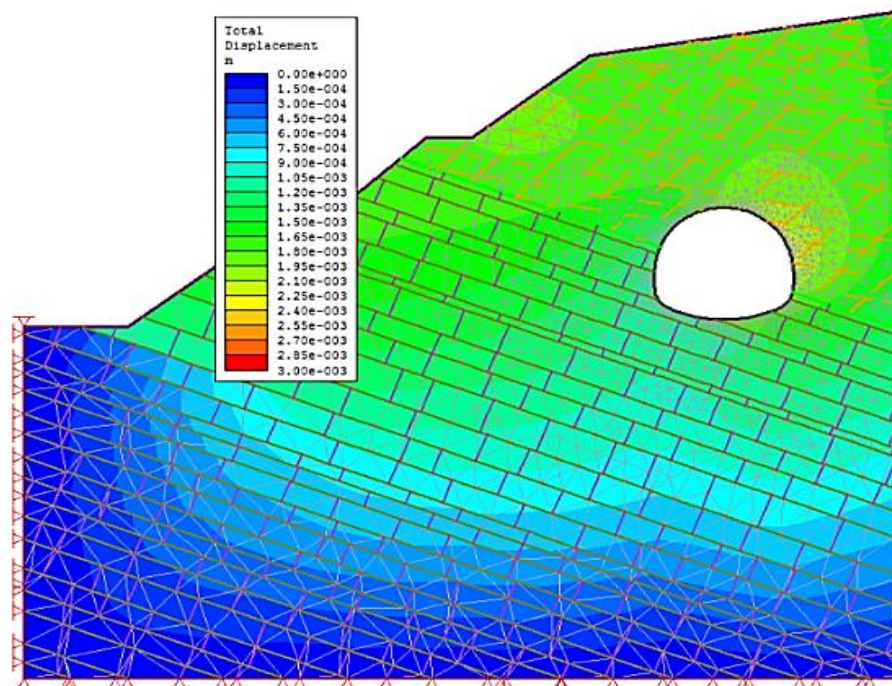
G= Módulo de Corte

Un macizo rocoso, es considerado como el ensamble de una serie de elementos estructurales interconectados mediante un número finito de nodos. Este método se ha desarrollado para suplir las falencias de los métodos empíricos y analíticos en el diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas. (Zienkiewicz et al., 1968).

El macizo rocoso que se desea simular se delimita (selección del dominio) y se divide en una serie de pequeños elementos de forma variable, en la que cada elemento es finito, esto es, definido

geométricamente y limitado en tamaño. A cada elemento se le asignan las propiedades del macizo rocoso, entre ellas la densidad, propiedades elásticas, de rotura, y post-rotura, que son específicas del mismo. Cuanto mayor sea el número de elementos, mayor será la aproximación a la realidad. Los desplazamientos de cada nodo serán considerados incógnitas y serán calculados. El estado tensional se calculará en uno o más puntos dentro de cada elemento (Pande et al., 1990).

El macizo rocoso, se modela en forma de malla, los elementos son discretizado en forma variable, a los que llamamos nodos. (Ver *Figura N°22*).



Fuente: (Rocscience, 2014)

Figura N° 22: Discretización de un Túnel por elementos finitos.

Una vez introducidas la malla y las propiedades de los materiales, así como las condiciones iniciales y de contorno, haciendo uso del programa PHASE , se resolverá de forma numérica y simultanea el conjunto de las ecuaciones de la mecánica de rocas (ecuaciones de equilibrio mecánico; ecuaciones constitutivas que normalmente incluyen elasticidad, condiciones de rotura y comportamiento post-rotura; y condiciones de continuidad y contorno), almacenadas en forma matricial y siguiendo normalmente un esquema de resolución implícito. En toda excavación subterránea o superficial, se requiere determinar el factor de seguridad. Una aproximación clásica usada, para determinar el factor de seguridad es la relación entre la capacidad "C" de soporte (fuerzas resistentes) y la demanda "D" (fuerzas que favorecen el fallamiento). Un factor $F = 1,3$ puede ser utilizado para labores subterráneas temporales y un factor de 1,5 a 2,0 para labores subterráneas Permanentes. Cuando la excavación tiene un factor de seguridad menor al permitido como estable, se recurre al sostenimiento temporal o permanente; Barton, Lien y Lunde proponen las siguientes categorías de excavaciones subterráneas, en función del tipo de sostenimiento. Como aplicación de estos principios de diseño cabría citar el Nuevo Método Austríaco, ya mencionado anteriormente (*Ver Pág. 09*).

2.7. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

2.7.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El domo de Yauli en el paleozoico, al NE de la hoja de Matucana, ha jugado un papel importante, es un complejo de intrusiones menores de facies hipabisales, diques y cuerpos lenticulares de composición diorítico, con textura de grano fino a medio; generalmente presenta una estructura bandeada y disyunción en bancos delgados, sub-verticales, que atraviesan todo el cuerpo rocoso, distribuido aisladamente a lo largo de toda la Cordillera correspondiente al este y norte de la hoja de Matucana, conocidos como zona marginal del Batolito Costanero. Estas unidades intrusivas cortan a las unidades formacionales más antiguas del Terciario lo cual significa que estos cuerpos intrusivos se emplazaron en una fase más tardía que el complejo de intrusiones del batolito de la costa. (COBBING et al., 1978).

Es importante señalar que la roca hipabisal, muestra cierto grado de mineralización de pirita y calcita en las fisuras de la roca encajonante Grupo Rímac, donde se infiere un proceso de diagénesis intrusivo que corta y metamorfiza termalmente, las

cuales en esta área no afloran pero tienen relación con las rocas sedimentarias.

La unidad litológica más antigua en el área de Matucana, corresponde al Grupo Excelsior de edad Paleozoico inferior a medio, que está en discordancia, a una gruesa secuencia de sedimentos debido al desarrollado del ciclo de sedimentación mesozoica seguido por una acumulación continental volcanoclástica del Cenozoico, afectada por las diversas fases del ciclo geotectónico andino, las cuales están constituidas, por el Grupo Rímac conjunto de unidades de rocas volcánicas - sedimentarias que fueron plegadas y cortadas en sus límites; está constituido por flujos de brecha, con ocasionales intercalaciones de lutitas y calizas; lo que ocasionalmente en algunos sectores de la formación se encuentran intruídos por cuerpos hipabisales. Los depósitos Cuaternarios están constituidos por depósitos coluviales, fluviotorrenciales y aluviales; que descansan discordantes sobre el Grupo Rímac. (McLaughlin et al., 1924). (Ver Anexo 8 ± Planos MGR-01).

2.7.2. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Geomorfológicamente el área de estudio, se ubica en la unidad de Superficie Puna, en donde se emplaza el valle del río Rímac

tipo “V”, el cual nace en los grandes macizos montañosos de la zona de Ticlio y Casapalca; morfológicamente en este sector del valle del río Rímac debe su configuración, a la actividad erosiva de los cursos de agua, su desarrollo hidrográfico está separado por penillanuras, y cadenas de cumbres concordantes que descienden; su génesis presenta un ciclo de erosión maduro a juvenil, disectado que profundiza a la “Superficie Puna” durante el Cuaternario antiguo y el Reciente, dejando como testigos de esta actividad, depósitos aluviales y fluvioglaciares, en terrazas, que suceden a diferentes niveles. (Salazar et al., 1983). (**Ver Anexo 8 ± Planos MGR-02**).

2.7.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL

2.7.3.1. GEOLOGÍA LOCAL

2.7.3.1.1. GRUPO RIMAC (Tim_R)

La configuración geológica, al portal de salida del Túnel – Chacahuaro II, se muestra como una zona de inflexión o quiebre en el flanco derecho del plegamiento del Grupo Rímac; exponiendo a fracturas paralelas en su propio eje al portal de salida; se le atribuye estos plegamientos y flexuramientos,

a la acción del domo de Yauli (macizo del paleozoico).

El Grupo Rímac está compuesta por unidades de rocas volcánicas y sedimentarias, localmente está constituido por secuencias sedimentarias de calizas de color gris oscuro, con textura bandeada de granos finos menores a 2 mm, presentan fracturas paralelas el eje del portal, con aperturas hasta de 5 mm, persistencia mayores a 20 m, ligeramente rugosa escalonada, con impurezas de pátinas de oxidación.

2.7.3.1.2. DEPÓSITOS CUATERNARIOS (Q)

• Depósitos Fluviotorrenciales (Qh-fl-t).-

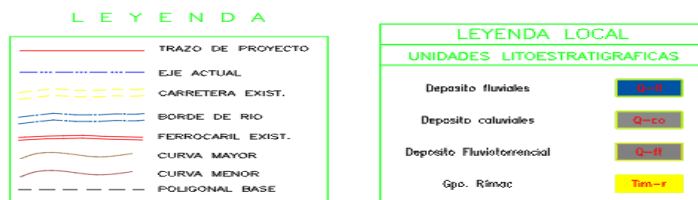
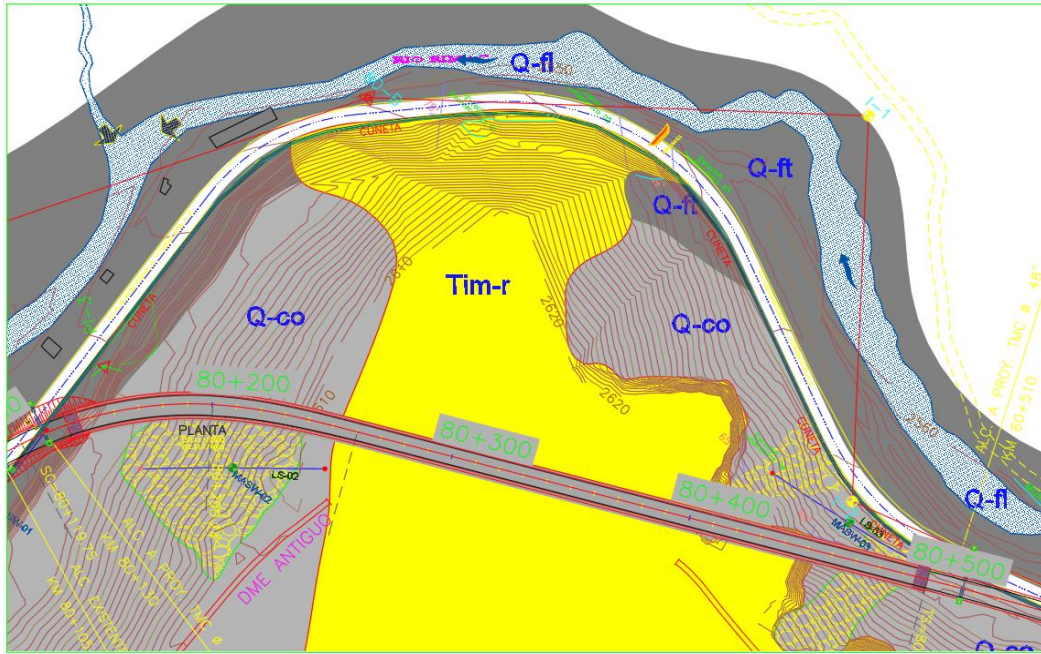
Conformados por clastos y bloques en proporciones variables de formas sub angulosas a sub redondeadas englobados en una matriz de grava limo-arcillosa. Estos depósitos se encuentran constituyendo terrazas de gran altura y con taludes pronunciados casi verticales evidenciándose de que estos depósitos se encuentran cohesionados y de compacidad media a alta, se encuentran sobreyaciendo al Grupo Rímac y se encuentra ubicado en el flanco izquierdo del portal de

salida del túnel donde se ha tenido que realizar banquetas debido a su inestabilidad.

- **Depósitos Tecnógeno (Qh-te).**- Son depósitos que se encuentran al pie de las escarpas de las laderas de los cerros, como material de escombros producto de la excavación del túnel ferroviario y que han sido arrojado a esta depresión generando a un cono de deyección. Litológicamente están constituidos por gravas y bloques sub-angulosos con matriz grava arenosa limosa y se encuentra en estado suelto. Este depósito está ubicado en el flanco derecho del portal de salida del túnel y debido a su inestabilidad se han emplazado micropilotes, para lograr su estabilidad y no comprometer a vía férrea que discurre en la parte alta.



Figura N° 23: Unidades litoestratigráficas, al portal de salida del túnel Chacahuaro II.



Fuente: (Propia 2018)

Figura N° 24: Mapa Geológico Local, de toda la variante Chacahuarro II.

2.7.3.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El área de estudio, forma parte al pie del flanco derecho aguas abajo del Río Rímac, el aspecto tectónico del domo de Yaulí, ha jugado un papel importante formando así montañas y lomadas con plegamientos muy flexurados, que en la parte alta de la salida del túnel los estratos están buzando a favor de la pendiente, que por efectos de la

gravedad, la lluvia, la probable actividad sísmica y la labor erosiva del río Rímac, ha originado un quiebre que ha dejado a los estratos del macizo rocoso en posición vertical justo en el pie del flanco del portal de salida del túnel Chacahuaro II.

2.7.3.2.1. UNIDADES MORFOLÓGICAS (Tim_R)

En la zona de estudio se tienen las siguientes geoformas:

- **Unidad de Laderas.-** La ladera directamente involucrada en el problema de inestabilidad, presenta un talud compuesto por una pendiente vertical de una altura 35 m y hacia arriba presenta un ángulo de inclinación de 63° , dicha unidad está constituida por afloramientos de roca caliza.



Figura N° 25: Unidad de laderas, mostrando el quiebre vertical muy abrupto.

- **Cono de deyección.-** Es una geoforma ubicada en el flanco derecho del portal de salida, su talud presenta un ángulo de inclinación en reposo de 45° , la cual supera al ángulo de fricción, originado por los escombros provenientes de la excavación del túnel ferroviario.



Figura N° 26: Cono de Deyección, escombros en el portal - túnel Chacahuaro II.

- **Terrazas Fluvio-Torrencial.-** Esta unidad morfológica que se ubica en flanco izquierdo del portal de salud, presenta pendiente de 45° , se muestra inestable y presenta una potencia máxima de 7.00 m.



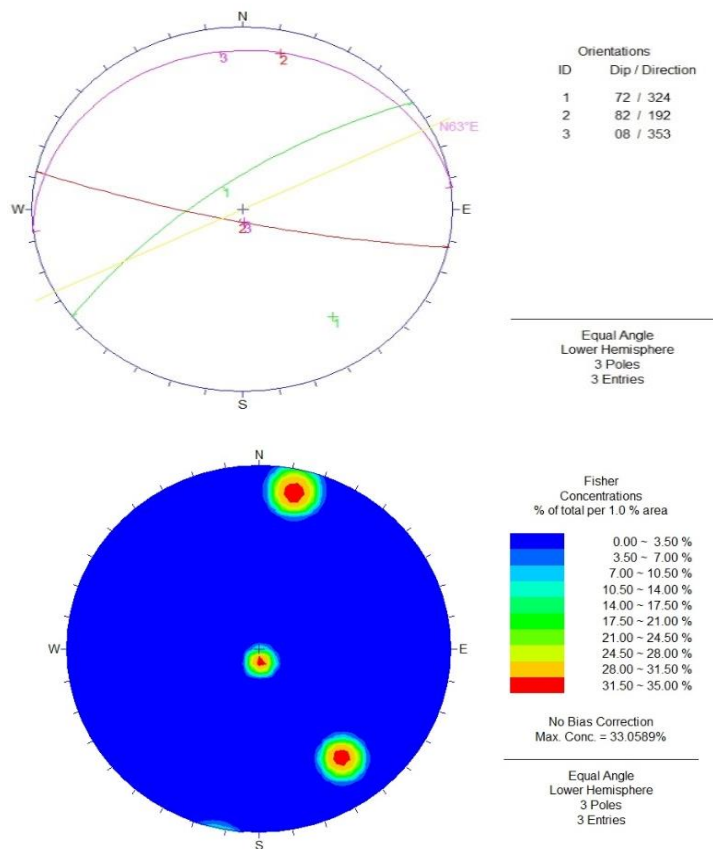
Figura N° 27: Terrazas Fluvio-Torrenciales, depositadas en el portal - túnel Chacahuaro II.

2.7.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

La configuración morfoestructural local forma parte del plegamiento al pie del flanco derecho aguas abajo del Río Rímac, está constituida por un talud compuesto, que en la parte alta de la salida del túnel los estratos están buzando a favor de la pendiente, y en la parte baja presenta un quiebre que ha dejado a los estratos del macizo rocoso en posición vertical justo en el pie del flanco al portal de salida, la cual no tiene una base de apoyo formando un ángulo contra talud muy accidentado. En el dominio geológico-estructural de la zona de estudio no se han encontrado evidencias de la existencia de fallas geológicas de carácter regional, sólo se ha podido identificar una falla local con rumbo $N75^{\circ}W$ y buzamiento $53^{\circ}NE$ en la progresiva 80+440, a 5m antes de la zona de derrumbe.

Las orientaciones principales de fracturas, fueron definidas mediante mapeos con estaciones geomecánicas, distribuidas estratégicamente en el frente de excavación al portal de salida del túnel, en la progresiva 80+445, se identificó a 3 familias de fracturas principales, se representó en el estereograma, la primera tiene una dirección de buzamiento de 324° y buzamiento de 72° grados, se muestra paralela al rumbo del

portal de salida del túnel, lo que es muy desfavorable siendo la el mecanismo de falla que anticipa desprendimientos escalonados, la segunda tiene una dirección de buzamiento de 192° y buzamiento de 82° grados, muestra una cuña pero que no es incidente en el rumbo del túnel y la tercera tiene una dirección de buzamiento de 353° y buzamiento de 08° grados, esta fractura está alejada del rumbo del túnel. **(Ver Anexo 2 ± Proyecciones Estereográficas, Planos MGEL-01).**



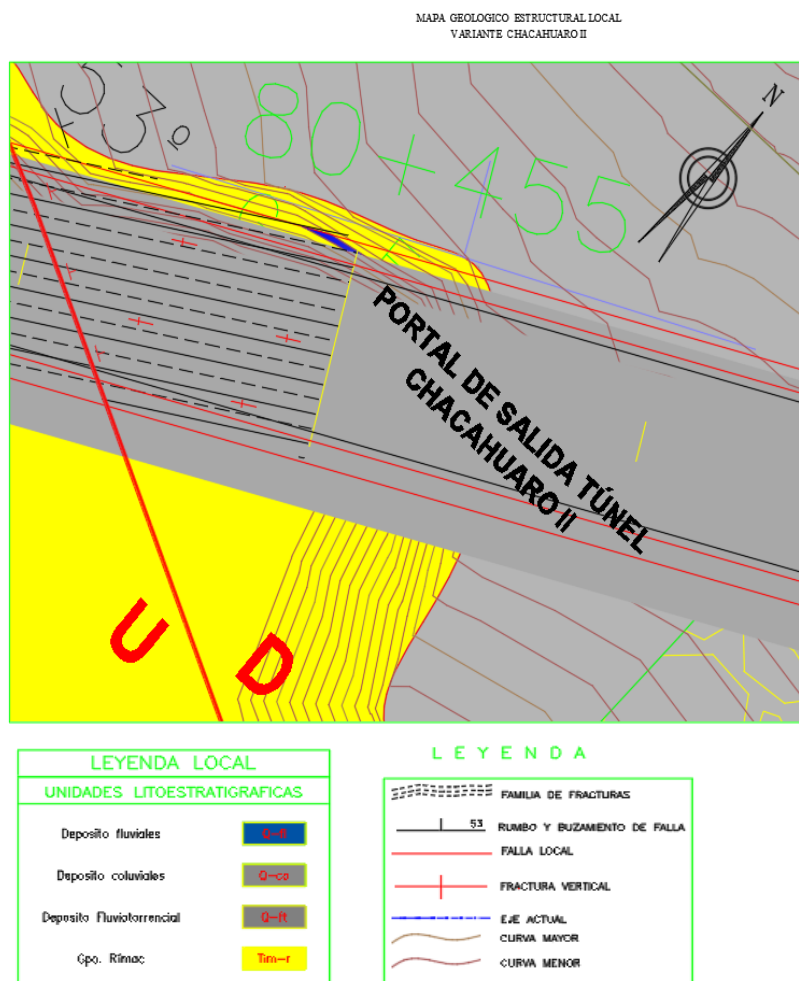
Fuente: (Propia 2018)

Figura N° 28: Proyección estereográfica y densidad de polos.

➤ **Tabla N° 08: Familia de discontinuidades identificadas en el portal d salida del Túnel Chacahuaro II.**

Portal Salida Túnel Chacahuaro II	PRINCIPALES FAMILIAS DE FRACTURAS			
	Familia 1 (Bz/DiBz)	Familia 2 (Bz/DiBz)	Familia 3 (Bz/DiBz)	Familia 4 (Bz/DiBz)
80+445	72° / 324°	82° / 192°	08° / 353°	-
80+450	64° / 158°	79° / 356°	08° / 316°	-
80+455	83° / 174°	78° / 354°	10° / 174°	61° / 073°

Rumbo de la excavación N63°E. Bz = Buzamiento , DiBz= Dirección de Buzamiento



Fuente: (Propia 2018)

Figura N° 29: Mapa geológico Estructural local, del área de estudio.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En el desarrollo para la elaboración de la presente tesis, se ha realizado las siguientes fases:

Etapa Preliminar se efectuó la recopilación y análisis de la siguiente información:

- “Estudio Definitivo Diseño de Túneles, Variante Chacahuaro II” de Ingeniería para Obras Excepto Obras De Puesta A Punto, Tramo 2: Puente Ricardo Palma–La Oroya, La Oroya–Huancayo Y La Oroya-Dv.Cerro De Pasco De La Carretera Irsa Centro, DEVIANDES, Mayo de 2012, Lima – Perú.
- “Especificaciones Técnicas para Túneles, Variante Chacahuaro II” Contrato de Concesión, Tramo 2: Puente Ricardo Palma–La Oroya, La Oroya–Huancayo Y La Oroya-Dv.Cerro De Pasco De La Carretera Irsa Centro, DEVIANDES, Mayo de 2012, Lima – Perú.
- “Boletín N° 48 - Geología del Cuadrángulo de Matucana – Hoja 24 – m”. Serie A de la Carta Geológica Nacional, INGEMMET, Diciembre de 1970, Lima – Perú.

- Fotografías satelitales “Earth. google”, en la edición Image NASA – Europa Technologies – Digital Globe 2008.

3.2. CAMPAÑAS DE TRABAJO DE CAMPO

Eta de Campo. Se desarrollaron los siguientes trabajos:

- Levantamiento Geológico local al portal de salida del Túnel Chacahuaro II, haciendo un reconocimiento de las principales unidades litológicas.
- Levantamientos topográficos y secciones típicas del túnel.
- Elaboración del cartografiado Geológico – Geotécnico.
- Toma de datos de orientaciones del sistema de familias de fracturas en campo.
- Recolección de datos cinemáticos del macizo rocoso en el frente de excavación, registrada por una ficha de clasificación geomecánica y tomas de fotos a escala representativa.

3.3. CAMPAÑA DE GABINETE

Eta de Gabinete. Comprende el procesamiento de información, cálculo, resultado y redacción de la tesis, a partir de la predicción del comportamiento geomecánico del macizo rocoso. Incluyendo los siguientes aspectos:

- Análisis a las familias de fracturas representativas, frente al comportamiento favorable o desfavorable de las direcciones de

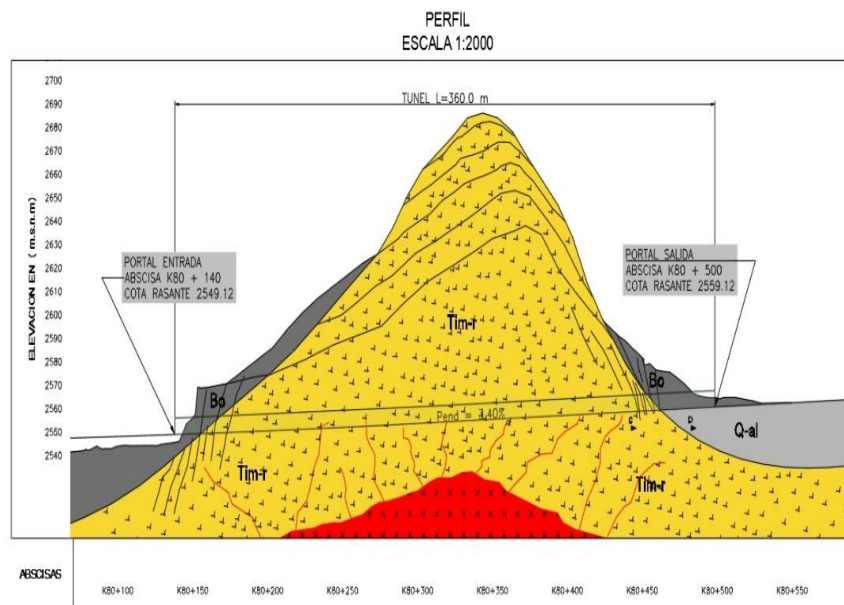
buzamientos existentes en el macizo rocoso, en la sección de excavación del portal de salida del Túnel Chacahuaro II.

- Se calculará la caracterización cinemática del frente de excavación del portal de salida del Túnel Chacahuaro II.
- Haciendo el uso del software RocData, se han obtenido los parámetros de Cohesión, ángulo de fricción, Módulo de Deformación, constantes adimensionales m , s y a .
- Para realizar los cálculos numéricos (MEF), se modelará y analizará la disposición de cuñas cinemáticas, empleando el software “Dips” y “Unwedge V3.0” de Rocscience, para obtener una idea clara, sobre el comportamiento cinemático de las familias de fracturas gobernantes.
- Se determina las principales formas de pérdidas de estabilidad del macizo rocoso, a partir de la aplicación del método de elemento finito (MEF).
- Se obtendrá los esfuerzos principales (σ_1 y σ_3), con ayuda del software “Phase V8.0” del paquete rocscience, para obtener y realizar el análisis tenso-deformacional y su factor de seguridad.
- Elaboración de la tesis.

3.4. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.4.1. MODELO GEOLÓGICO

El modelo geológico del portal de salida del túnel Chacahuaro II, está representada por la distribución espacial de las unidades litoestratigráficas, estructuras tectónicas, datos hidrogeológicos, entre otros, presentes en el siguiente perfil longitudinal. (Ver **Anexo 8 ± Planos CGL-01**).



CONVENCIONES			
ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRAFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Bolonero, fragmento de roca Bo
			Depósitos Fluviotorrencial Q-fl
			Depósitos aluviales Q-al
	TERCIARIO	MEDIO	Gpo. Rimoc Tm-r
	INFERIOR		

NOTAS:

1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN METROS EXCEPTO DONDE SE INDIQUE UNA UNIDAD DIFERENTE.
2. LAS COTAS DEL PROYECTO QUE SE INDICAN EN ESTE PLANO CORRESPONDEN A LA RASANTE TERMINADA.
3. NO SE MUESTRAN LOS DETALLES DE SOPORTE DEL TUNEL.

Fuente: (Propia 2018)

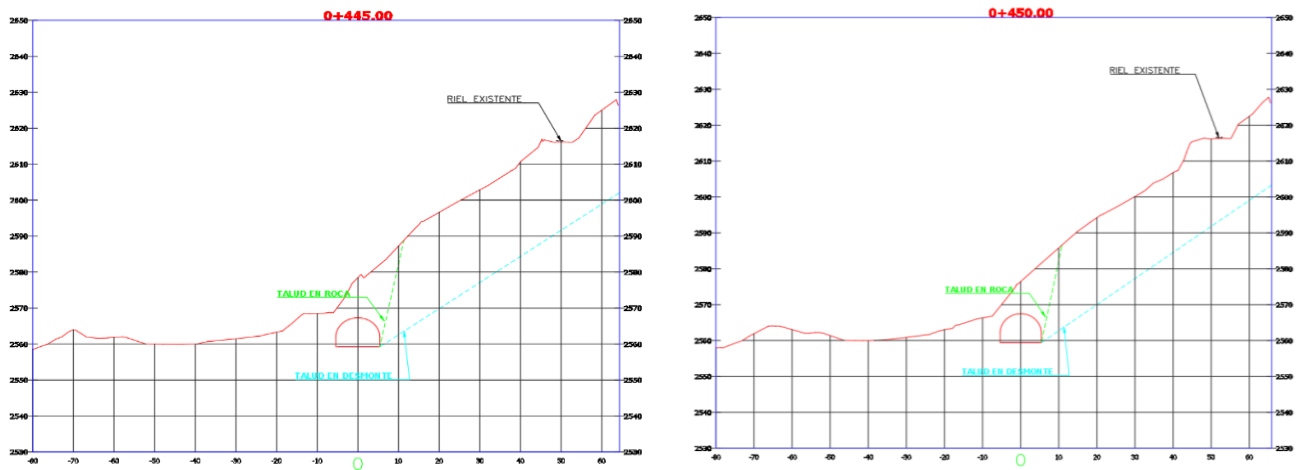
Figura N° 30: Modelo geológico, perfil longitudinal del área de estudio.

3.4.2. MODELO GEOTECNICO

3.4.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Se procedió a analizar 03 secciones transversales que representan, el portal de salida del Túnel Chacahuaro II, para la evaluación del modelo geotécnico. (Ver Anexo 1 –

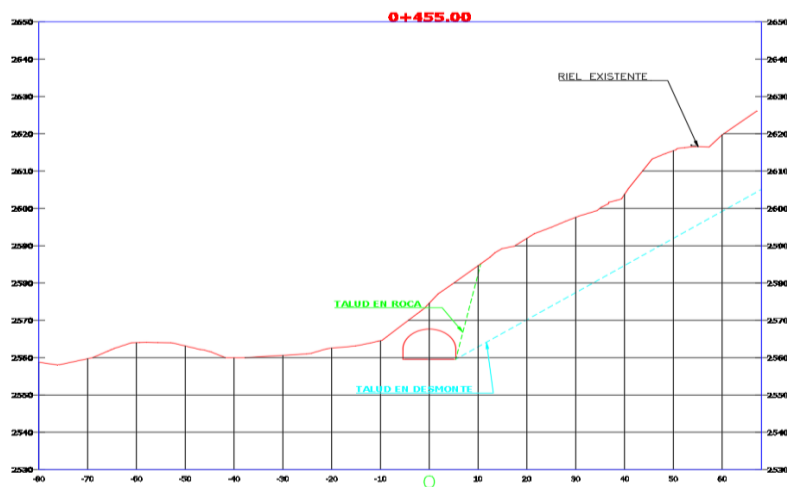
Registros De Levantamientos Geomecánicos).



Fuente: (Propia 2018)

Fuente: (Propia 2018)

Figura N° 31: a) Sección 80+445, tipo de roca clase III. b) Sección 80+450, roca clase IV.



Fuente: (Propia 2018)

Figura N° 32: Progresiva 80+455, tipo de roca clase III.

Para determinar la caracterización de un macizo rocoso, se utilizó el método de caracterización por Celdas, el mapeo por celdas se hizo con estaciones geomecánicas, distribuidas en el portal de salida del túnel.

Progresiva 80+445, primera estación geomecánica, representada por 3 familias de fracturas en el frente de excavación, la principal está paralela el eje del portal de salida (**Ver Anexo 2 ± Proyecciones Estereográficas**), con aperturas hasta de 5 mm, una persistencia hasta 20 m, ligeramente rugosa de forma escalonada, sin presencia de relleno, con un grado de meteorización moderado por oxidación y de separación entre discontinuidades de 0,2 a 0,6m; se consideró la presencia de goteo persistente para época de lluvias, así mismo se hizo un castigo de valor por la orientación de las discontinuidades que son muy desfavorables; resultando un RQD de 69%, con RMR de 44 siendo su calidad como macizo rocoso, una roca regular de clase de tipo III.

Progresiva 80+450, segunda estación geomecánica, representada por 3 familias de fracturas en el frente de excavación, la principal está paralela el eje del portal de

salida (**Ver Anexo 2 ± Proyecciones Estereográficas**), con aperturas hasta de 5 mm, una persistencia hasta 20 m, ligeramente rugosa de forma escalonada, sin presencia de relleno, con un grado de meteorización moderado por oxidación y de separación entre discontinuidades de 0,2 a 0,6m; se consideró la presencia de goteo persistente para época de lluvias, así mismo se hizo un castigo de valor por la orientación de las discontinuidades que son muy desfavorables; resultando un RQD de 26%, con RMR de 32 siendo su calidad como macizo rocoso, una roca mala de clase de tipo IV, lo cual anticipa una zona inestable y que debe ser estabilizada.

Progresiva 80+455, tercera estación geomecánica, representada por 3 familias de fracturas en el frente de excavación, la principal está paralela el eje del portal de salida (**Ver Anexo 2 ± Proyecciones Estereográficas**), con aperturas hasta de 0,1 a 1,0 mm, una persistencia hasta 20 m, ligeramente rugosa de forma escalonada, presenta rellenos blandos con espesores menores a 5,0 mm, con un grado de meteorización moderado por oxidación y de separación entre discontinuidades de 0,2 a 0,6m; se

consideró la presencia de goteo persistente para épocas de lluvias, así mismo se hizo un castigo de valor por la orientación de las discontinuidades que son muy desfavorables; resultando un RQD de 42%, con RMR de 36 siendo su calidad como macizo rocoso, una roca mala de clase de tipo IV, lo cual anticipa una zona inestable y que debe ser estabilizada.

Los índices de calidad estimados para cada dominio están resumidos e indicados en la tabla 09.

➤ **Tabla N° 09: Evaluación de calidad del macizo rocoso.**

Túnel Chacahuaro II	Progresivas (m)	RQD (%)	RMR	Q	GSI	Clase
Portal de Salida	80+445	69	44	1,0	59	III
	80+450	26	32	0,3	47	IV
	80+455	42	36	0,4	51	IV

Fuente: (Propia ,2018)

3.4.2.2. DOMINIOS GEOTECNICOS

Los esfuerzos principales, fueron calculados al macizo rocoso, siguiendo la metodología expuesta anteriormente en el fundamento teórico (*Ver Pág. 23 al 26*). Para el caso en estudio y teniendo en cuenta que el peso unitario promedio del macizo caliza es de 21,1 kN/m³. (**Ver Anexo 5 – Ensayos de Laboratorio**).

➤ **Tabla N° 10: Esfuerzos verticales - horizontales y profundidad bajo superficie.**

Progresiva	Z (m)	Y (kN/m ³)	K	σ_v (MPa)	σ_H (MPa)	Clase
80+445	11,20	21,10	4,40	0,24	1,04	III
80+450	9,10	21,10	5,35	0,19	1,03	IV
80+455	7,20	21,10	6,68	0,15	1,02	IV

Fuente: (Propia ,2018)

La excavación en el portal de salida para roca tipo III a IV, se encuentra representada por profundidades que van desde 11,2 m a 7,2m, el nivel de esfuerzo vertical in situ varía desde 0,15 a 0,24 Mpa. Para el presente caso se ha estimado un valor de K que va desde 4,40 a 6,68, habiéndose estimado que el esfuerzo horizontal varía entre 1,02 a 1,04 MPa. Los parámetros de resistencia, se obtuvieron por ensayos de laboratorio, de resistencia a la compresión simple. **(Ver Anexo 5 – Ensayos de Laboratorio)**. Para el cálculo de los parámetros de la deformabilidad, se tomó como valor adimensional de la variable “mi”, de la tabla N°06, de “Hoek & Brown”, **(Ver Pág. 21, del fundamento teórico)**, que al final fueron calculados al macizo rocoso y siguiendo la metodología expuesta anteriormente en el marco teórico **(Ver Pág. 15 al 17)**, cuyos resultados se presentan en la tabla 11.

➤ **Tabla N° 11: Propiedades elásticas y de resistencia del macizo rocoso.**

Progresiva	ϕ°	C (kPa)	m_b	s	σ_{cmi} (MPa)	E (MPa)	v
80+445	60	1,652	1,821	0,0112	113,04	19405	0,501
80+450	59	0,217	0,544	0,0005	83,00	4983	0,507
80+455	61	0,314	0,677	0,0008	91,00	6568	0,505

Fuente: (Propia ,2018)

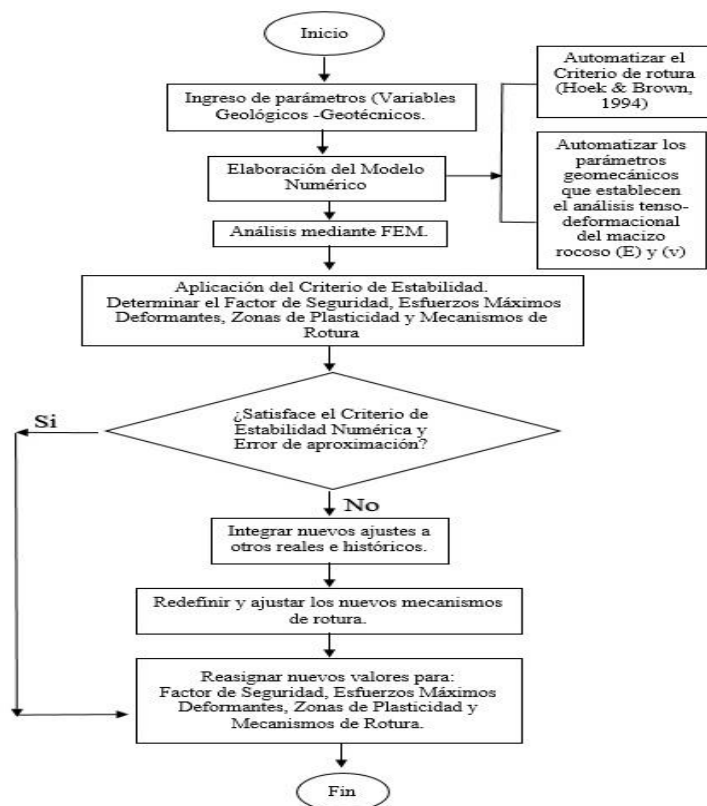
Los resultados mostrados en la tabla 11, se observa que los valores obtenidos para el módulo de elasticidad estático (E), el coeficiente de Poisson (μ) y la resistencia a la compresión simple (σ_c) son coherentes con los encontrados en la bibliografía geotécnica, según (Vallejo et al., 2002).

3.4.3. MODELO MATEMÁTICO

3.4.3.1. ALGORITMO

El modelo usa un esquema centrado de métodos de elementos finitos para la solución de las ecuaciones diferenciales de equilibrio y ecuaciones constitutivas del material, formando un sistema de ecuaciones matriciales sujetos al criterio de falla de Hoek & Brown, donde ejecuta de forma iterativa. Las secciones del portal de salida del túnel se discretiza en una malla formada elementos triangulares para toda el área de la sección y a cada elemento se le asigna parámetros cinemáticos, como

propiedades elásticas, resistencia, fracturas y geomecánicas, con el objetivo de obtener mecanismos de rotura del macizo rocoso, zonas de concentración de tensiones, zonas de plastificación, con el fin de establecer un equilibrio, al nuevo campo de esfuerzos y deformaciones (calcular una estabilidad en excavaciones subterráneas). Para conceptualizar el proceso de los elementos finitos se elaboró el diagrama de flujo, que representa el proceso a seguir, tal como se observa en la figura N°33



Fuente: (Propia 2018)

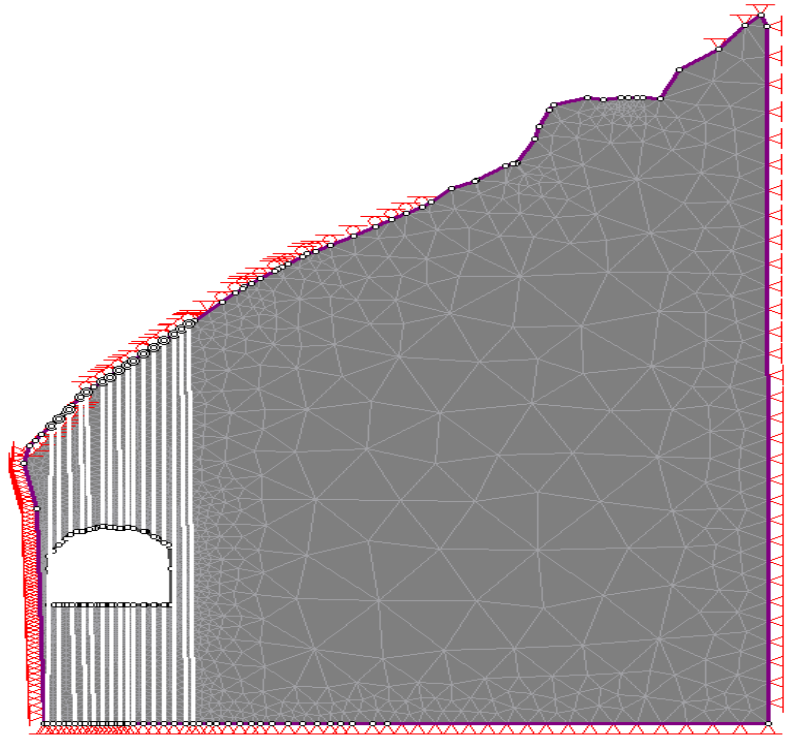
Figura N° 33: Diagrama de flujo FEM.

3.4.3.2. CONDICIÓN DE CONTORNO

Las condiciones de contorno deben estar alejadas de la superficie de excavación subterránea, a fin de evitar errores concernientes con la interacción de la malla, estando en el portal de salida del túnel Chacahuaro II, se definieron las condiciones de contorno, considerando que el hastial derecho se ubica hacia el interior de la montaña y piso de la rasante , se definió en condición de contorno tipo cerrado, mientras que el hastial izquierdo y bóveda del túnel se ubica en el lado exterior y parte alta de la montaña respectivamente, se definió su condición de contorno tipo abierto. **(Ver figura N°34)**

3.4.3.3. DRISCRETIZACIÓN

Se discretizó al portal de salida del túnel Chacahuaro II, en elementos geoméricamente simples de tipo triangular, a los que se les determinó las propiedades del macizo rocoso, donde la interacción y comportamiento colectivo de estos elementos permitió modelar tipos de comportamientos complejos del mismo (esfuerzos tenso-deformantes). **(Ver figura N°34).**



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 34: Condición de contorno y discretización.

CAPÍTULO IV

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1. APLICACIÓN DEL MEF PARA EL ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL

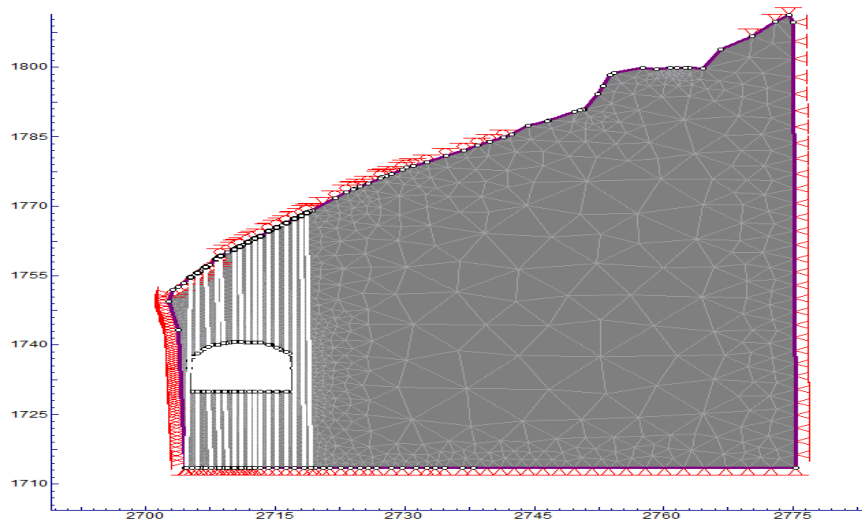
El análisis de esfuerzo-deformación se realizó con el programa Phase2 versión 8.0 de Rocscience Inc., el cual emplea una combinación de los métodos de elementos finitos con condiciones de contorno. Dicho programa asume que el macizo rocoso puede ser tratado como un medio isotrópico o anisotrópico. Los esfuerzos calculados en forma elástica pueden ser contrastados con cualquier criterio de falla (Mohr-Coulomb o Hoek-Brown) a fin de determinar si existe la posibilidad de que se presenten zonas potencialmente inestables. La malla de elementos finitos fue de tipo triangular, representada geoméricamente por una sección topográfica, permitiendo extender el análisis hasta toda la sección topográfica de influencia de la excavación. El análisis consistió en modelar el comportamiento post falla del macizo rocoso, así mismo calcular los esfuerzos tenso-deformantes, los resultados del análisis numérico se consignan en los siguientes cálculos.

4.2. DISCUSIÓN

En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°35, N°36 y N°37, la parte superficial y hastial izquierdo se emplea como condición de contorno tipo abierto o movable, como se mencionó anteriormente, ya que implican la alteración de los esfuerzos iniciales que estaban en equilibrio, provocando posibles deformaciones; y en el hastial derecho y piso de la rasante, que se ubican hacia el interior de la montaña, por estar confinados presenta una condición de contorno de tipo cerrado.

Como es un macizo rocoso con sistemas de fracturamiento paralelas al eje del portal de salida del túnel, es considerado como un medio discontinuo; la masa de roca es representada como un ensamble de distintos cuerpos interactuando entre ellos, los que a su vez son subdivididos en una malla de elementos finitos tipo triangular, debido se ajusta mejor a la morfología del túnel, lo que permite ser representado bajo las leyes de esfuerzo-deformación.

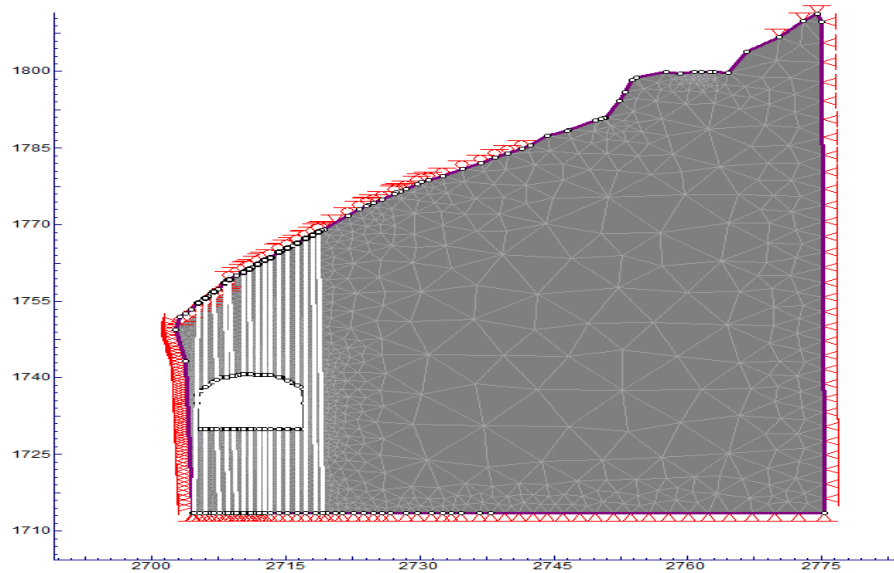
PROGRESIVA 80+445 PORTAL DE SALIDA TÚNEL CHACAHUARO II



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 35: Sección de la progresiva 80+445 - Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).

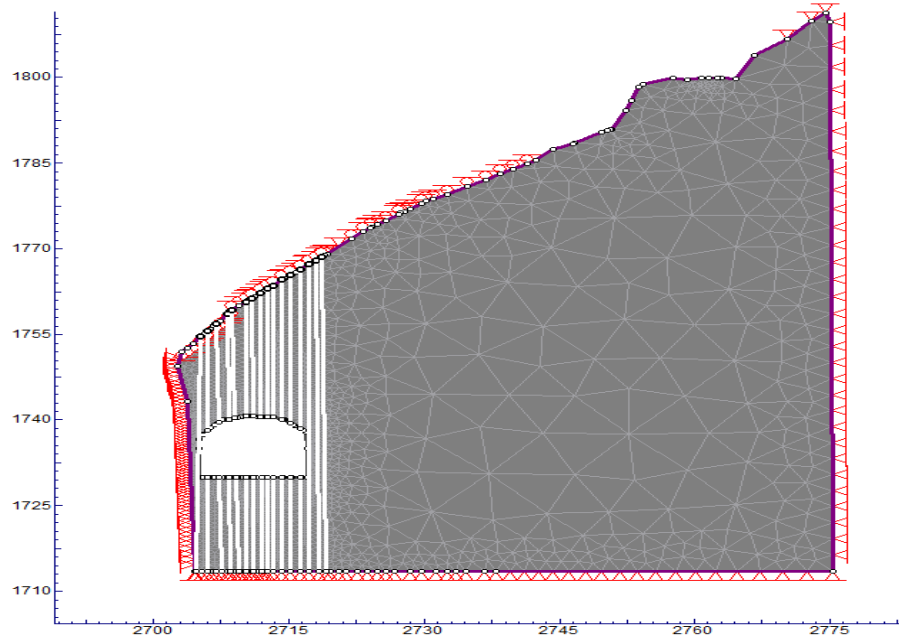
PROGRESIVA 80+450 PORTAL DE SALIDA TÚNEL CHACAHUARO II



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 36: Sección de la progresiva 80+450 - Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).

PROGRESIVA 80+455 PORTAL DE SALIDA TÚNEL CHACAHUARO II

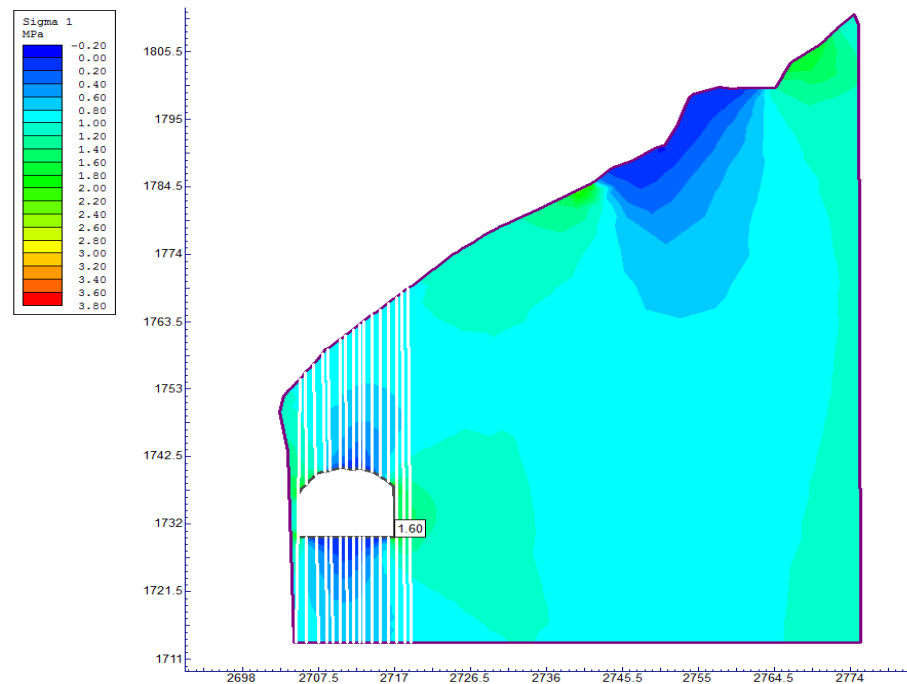


Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 37: Sección de la progresiva 80+455 - Portal de salida Chacahuaro II, se muestra el mallado (discretización).

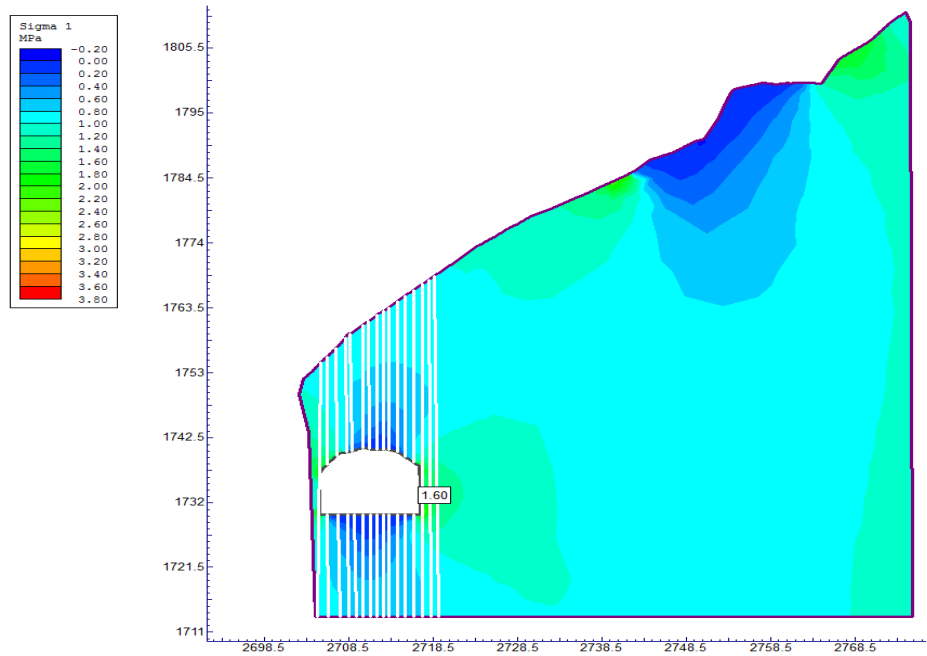
En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°38, N°39 y N°40, el mayor campo de esfuerzo principal es el σ_1 , actúa en dirección horizontal sobre el macizo rocoso, (roca regular a mala de clase de tipo III a IV), esto se debe por su configuración morfoestructural de los estratos y fracturas, presenta un quiebre en la parte baja, que ha dejado a los estratos del macizo rocoso en posición vertical, esto se atribuye que en el pie del flanco derecho del plegamiento, no tiene una base de apoyo formando un ángulo contra talud muy accidentado. La cual connota una deformación plástica más horizontal que vertical y frágil debido a las

fracturas, ya que presenta un módulo de elasticidad alto con valores entre 19 405 hasta 6 568 Mpa, y un coeficiente de Poisson relativamente bajo con valores adimensionales entre 0,501 hasta 0,505 (*Ver Tabla II*), de acuerdo a cálculos anteriores. La zona verde representa que el esfuerzo principal σ_1 , se presenta en el hastial derecho con valores de tensiones horizontales mayores hasta de 1,60 Mpa y que la zona azul en la bóveda es representa valores de tensiones menores, al portal de salida del túnel Chacahuaru II.



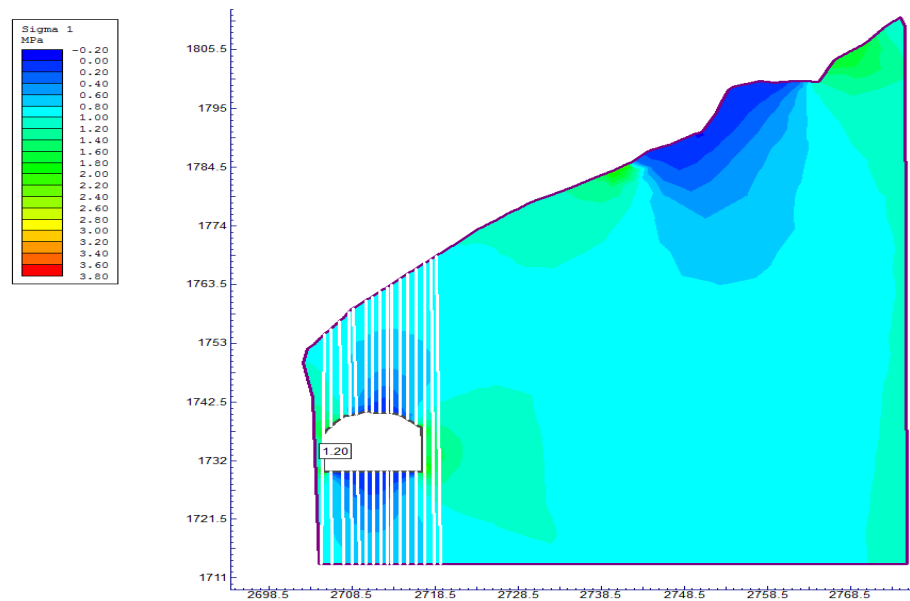
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 38: Sección de la progresiva 80+445 - Portal de salida Chacahuaru II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo III. Con cargas de hasta 1,60 Mpa en los hastiales.



Fuente: (Propia, 2018)

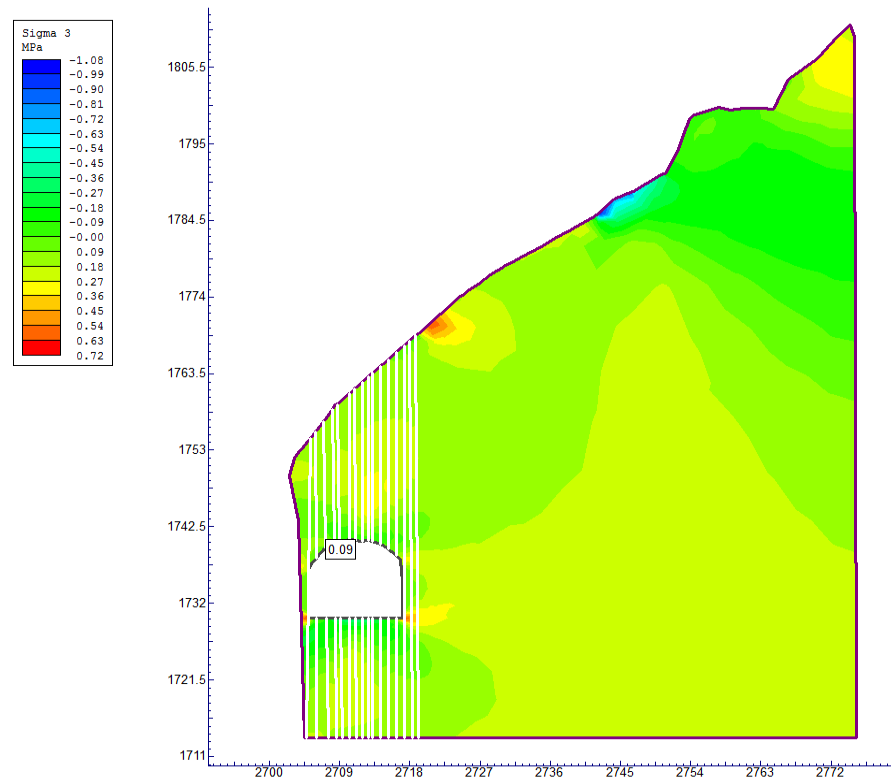
Figura N° 39: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 1,60 Mpa en los hastiales.



Fuente: (Propia, 2018)

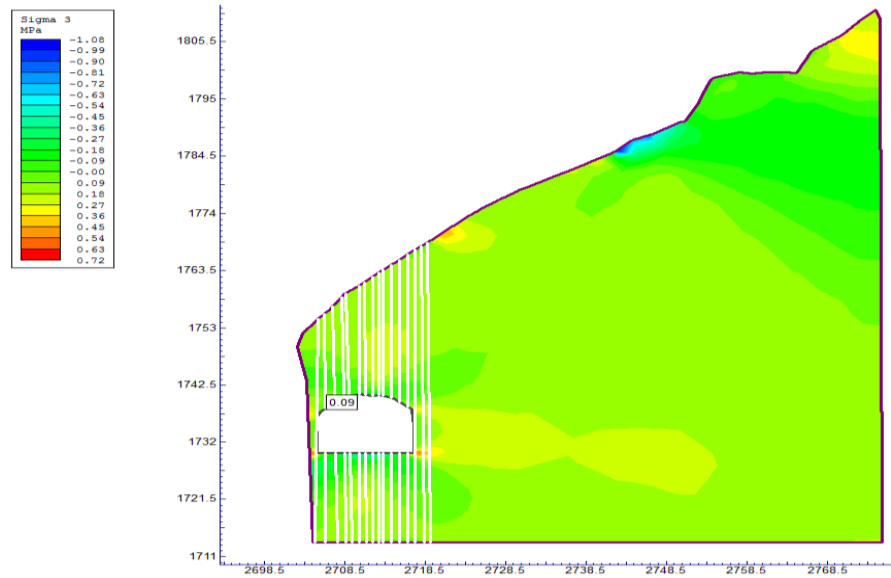
Figura N° 40: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_1 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 1,2 Mpa en los hastiales.

En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°41, N°42 y N°43, el otro esfuerzo principal es el σ_3 , actúa en dirección vertical sobre el macizo rocoso, (roca regular a mala de clase de tipo III a IV), esto se debe por la relación, del peso unitario de la misma formación litológica por la profundidad ubicada de la sección de excavación, la cual connota una deformación plástica más vertical que horizontal y frágil debido a las fracturas. La zona verde representa que el esfuerzo principal σ_3 , se muestra incidiendo en la bóveda con valores de tensiones mayores hasta de 0,09 Mpa y que en los hastiales no influye esta tensión vertical dando valores a 0,00 Mpa, al portal de salida del túnel Chacahuaro II.



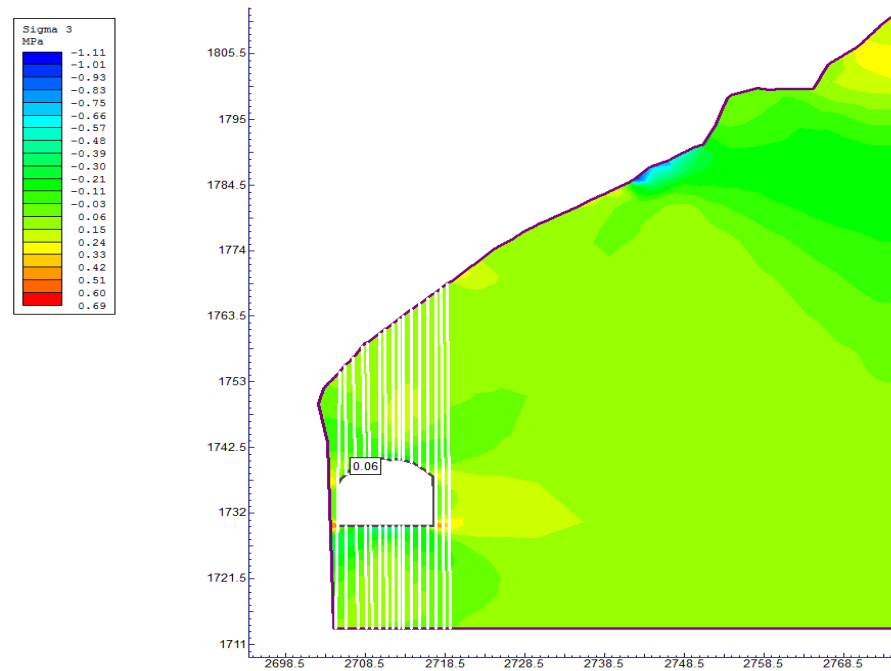
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 41: Sección de la progresiva 80+445 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo III. Con cargas de hasta 0,09 Mpa en la bóveda.



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 42: Sección de la progresiva 80+450 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 0,09 Mpa en la bóveda.

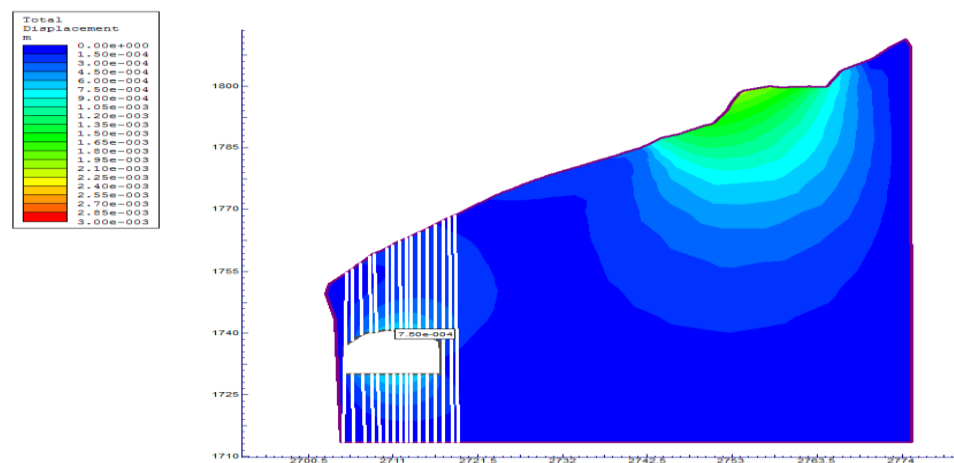


Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 43: Sección de la progresiva 80+455 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los esfuerzos principales σ_3 , roca tipo IV. Con cargas de hasta 0,06 Mpa en la bóveda.

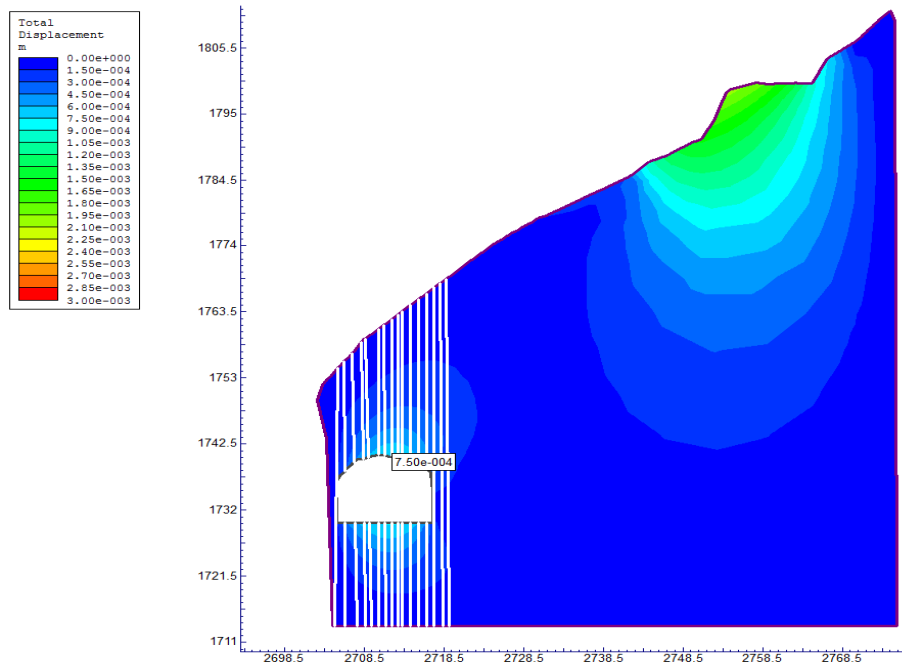
En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°44, N°45 y N°46, es un macizo rocoso de roca regular a mala de clase de tipo III a IV, muestra un modelo de deformación que adopta un comportamiento plástico y frágil debido a las fracturas ya mencionado líneas arriba, siendo estas las que condicionan la existencia de zonas de plastificación.

La zona celeste, representa desplazamientos importantes en la bóveda con valores mayores hasta de 0,0007m, la cual explica que hay una pérdida de resistencia por deformación, así mismo se observa otros desplazamientos en la parte alta del talud alejadas de la zona del túnel próximas a la línea ferria existente, las cuales ya existían antes de la construcción de la variante Chacahuaro II, mientras que en la zona azul no existe desplazamientos.



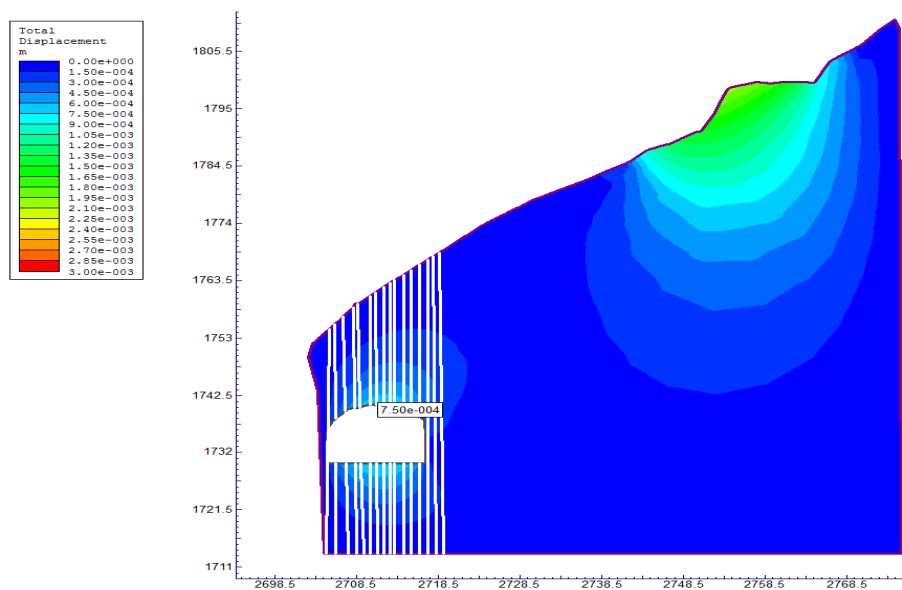
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 44: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo III. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.



Fuente: (Propia, 2018)

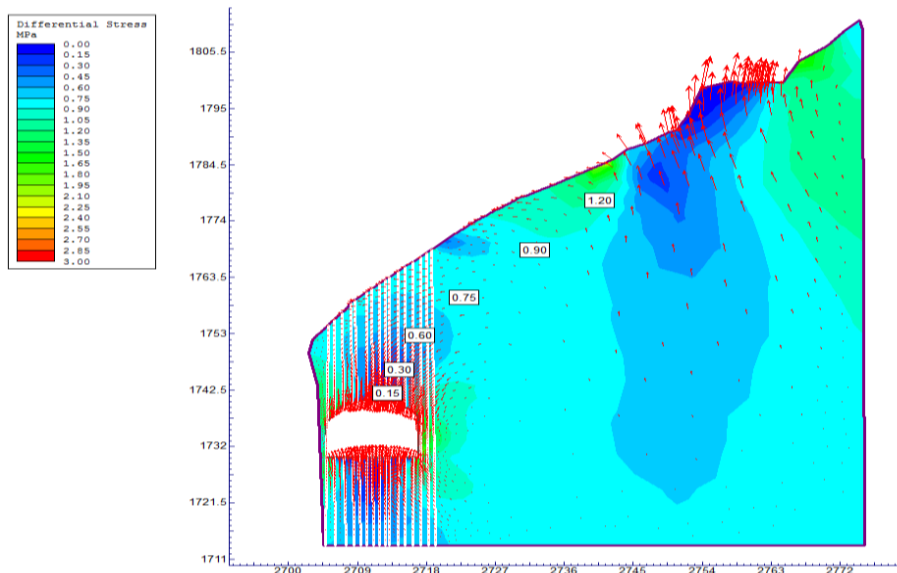
Figura N° 45: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo IV. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.



Fuente: (Propia, 2018)

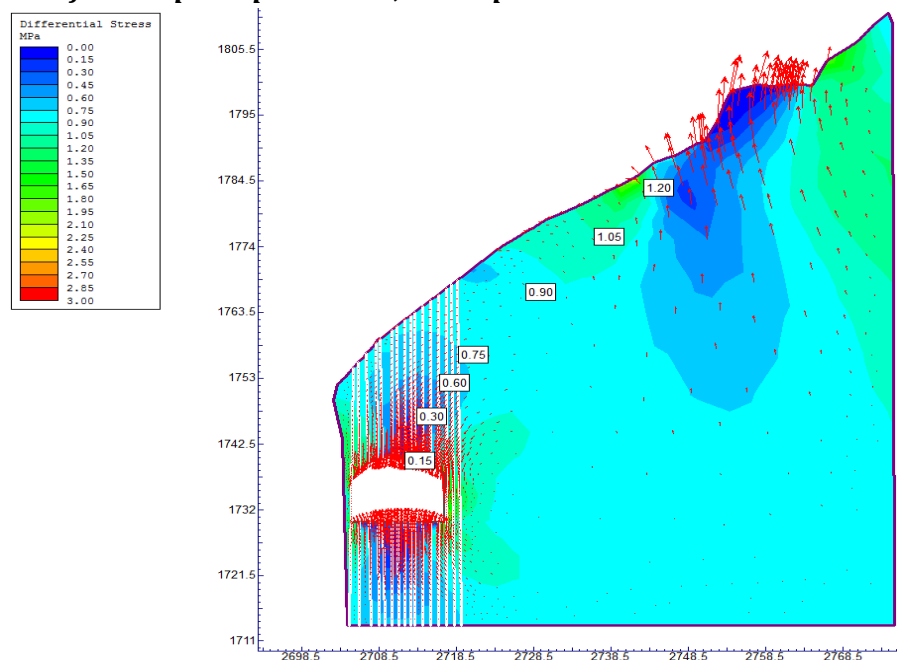
Figura N° 46: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico de los desplazamientos, roca tipo IV. Los desplazamientos son 0,00075m, en la bóveda.

En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°47, N°48 y N°49, es un macizo rocoso de roca regular a mala de clase de tipo III a IV, muestra el diferencial o resultante de la combinación de esfuerzos principales de σ_1 - σ_3 , se da una connotación de tensiones muy peculiar, dando una tensión resultante de dirección diagonal, producto de la combinación de esfuerzos principales tanto la componente horizontal (σ_1) con la vertical (σ_3). La zona verde y celeste en el hombro de talud, representa una distribución diagonal resultante, con tensiones mayores hasta de 1,20 Mpa, y la zona azul manifiesta una distribución vertical en la bóveda y hastiales con valores de tensiones resultantes hasta de 0,15 Mpa, todos estos esfuerzos son tenso-deformantes, es un fenómeno natural que exhibe al macizo como una pérdida de resistencia por deformación, lo que anticipa una zona de desprendimiento en bloques y escalonados al portal de salida del túnel Chacahuaró II.



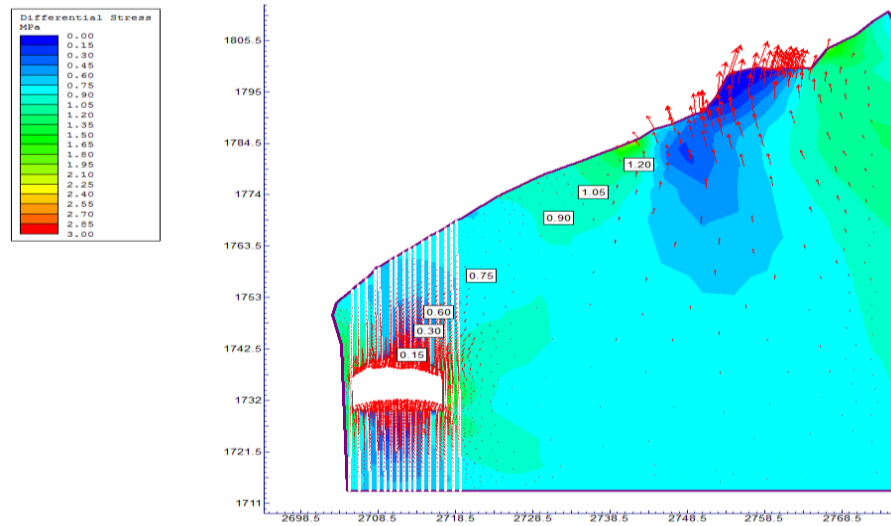
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 47: Sección de la progresiva 80+445 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo III.



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 48: Sección de la progresiva 80+450 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo IV.



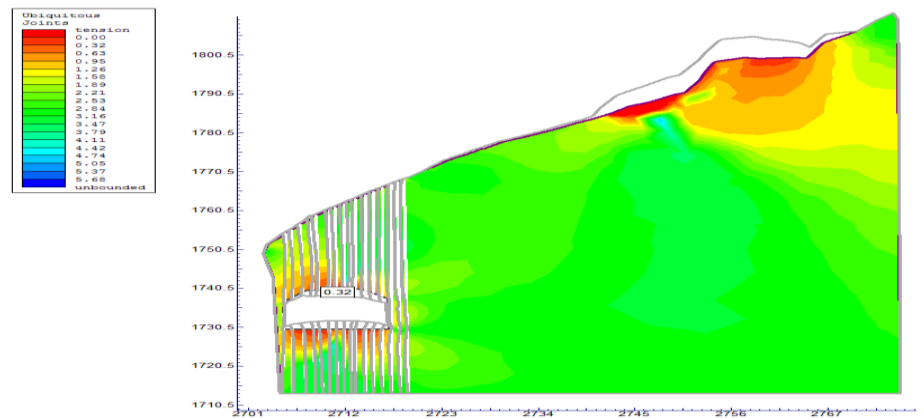
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 49: Sección de la progresiva 80+455 – Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico del comportamiento combinando de los esfuerzos principales σ_{1-3} , roca tipo IV.

En el portal de salida del túnel, entre las progresivas 80+445 hasta la progresiva 80+455, figuras del N°50, N°51 y N°52, es un macizo rocoso de roca regular a mala de clase de tipo III a IV, con fracturas en posición paralela al eje del túnel, atribuyéndola a estas como el mecanismo de falla que controla a los esfuerzos principales que están en equilibrio, condicionando la existencia de zonas de plastificación, hasta fallarlas.

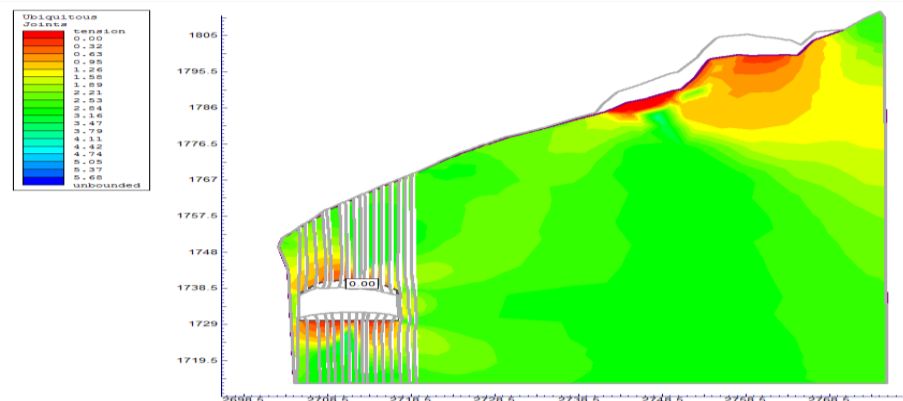
Lo que origina en la bóveda de la sección de excavación, una zona crítica de deformación, lo que anticipa desprendimientos escalonados en todo el portal de salida. La zona roja representa factores de seguridad muy crítico de 0,32 tendientes a cero, lo cual indica que se requiere dar sostenimiento antes de continuar con el proceso constructivo, la parte

alta del talud, debería ser evaluada con estudios específicos pertinentes, para descartar si el talud íntegro está comprometido como zona de riesgo por inestabilidad, debido a la configuración morfoestructural y a los resultados de la evaluación del análisis tenso-deformacional del macizo rocoso.



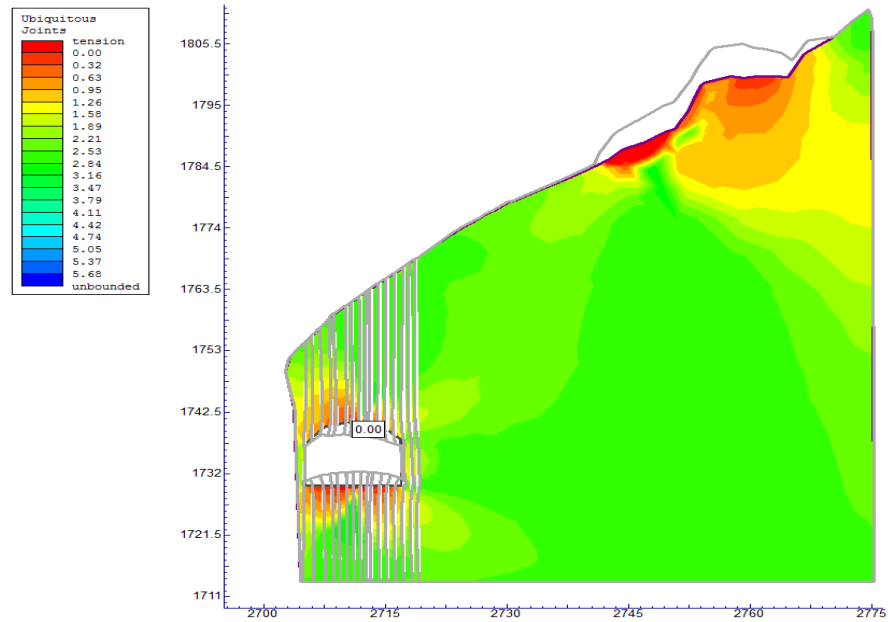
Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 50: Sección de la progresiva 80+445 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II ,roca tipo III.



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 51: Sección de la progresiva 80+450 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II ,roca tipo IV.



Fuente: (Propia, 2018)

Figura N° 52: Sección de la progresiva 80+455 - Portal de salida Chacahuaro II, análisis numérico cálculo del factor de seguridad, grado de afectación y deformación, que generan las fracturas paralelas al portal de salida del túnel Chacahuaro II, roca tipo IV.

5. CONCLUSIONES

- El análisis tenso-deformacional del macizo rocoso al portal de salida del túnel Chacahuaro II entre las progresivas 80+445 al 80+455, HA PERMITIDO conocer las zonas de plastificación que muestra a las fracturas paralelas como el mecanismo de falla que controla a los esfuerzos principales que están en equilibrio; fenómeno natural que exhibe al macizo como una pérdida de resistencia por deformación, lo que anticipa desprendimientos escalonados en todo el portal de salida.
- El modelo Geológico – Geomorfológico, indica que la zona está constituida por rocas volcánico sedimentarias del Grupo Rímac, con intercalaciones de lutitas y calizas principalmente, que han sido flexuradas por la presencia de cuerpos hipabisales, formando un anticlinal abatido, y que en la zona del portal de salida en la parte alta los estratos están a favor de la pendiente y en la parte misma del portal de salida presenta un quiebre que ha dejado a los estrados en posición vertical.
- Los parámetros geomecánicos determinados, han permitido hacer el análisis tenso-deformacional del macizo rocoso, exponiendo una deformación plástica y frágil (debido a las fracturas), ya que presenta un módulo de elasticidad alto y un coeficiente de Poisson relativamente

bajo; demostrando que todos los macizos no presentan un comportamiento ideal.

- Se concluye que, la combinación de esfuerzos principales de σ_1 - σ_3 , da una tensión resultante de dirección diagonal, que va desde la parta alta del talud, hasta los hastiales al portal de salida del túnel Chacahuaro II, mostrando un modelo de deformación que adopta un comportamiento plástico y frágil por las fracturas.
- Se concluye que la convergencia máxima ocurrirá en los hastiales y bóveda al portal de salida del túnel entre las progresivas 80+445 al 80+455, se anticipa la ocurrencia de deformación para el caso de la roca tipo III. Por lo que se espera fallas importantes debido a que el túnel se está cerrando (ver anexos mediciones de convergencia).
- Se concluye que, Método de Elementos Finitos, es una herramienta útil de cálculo computacional , ya que permite obtener los esfuerzos tenso-deformantes máximos, mecanismos de rotura, el factor de seguridad en macizos rocosos sujetos a excavación subterránea, así también ubicar zonas de plastificación condicionado por discontinuidades (fallas, fracturas).

- En el cuadro siguiente se resumen los resultados calculados, de los índices de calidad del macizo rocoso, en el portal de salida.

Túnel Chacahuaro II	Progresivas (m)	RQD (%)	RMR	Q	GSI	Clase
Portal de Salida	80+445	69	44	1,0	59	III
	80+450	26	32	0,3	47	IV
	80+455	42	36	0,4	51	IV

- En el cuadro siguiente se resumen los resultados calculados, de los esfuerzos principales del macizo rocoso y profundidad bajo superficie.

Progresiva	Z (m)	Y (kN/m³)	κ	σ_v (MPa)	σ_H (MPa)	Clase
80+445	11,20	21,10	4,40	0,24	1,04	III
80+450	9,10	21,10	5,35	0,19	1,03	IV
80+455	7,20	21,10	6,68	0,15	1,02	IV

- En el cuadro siguiente se resumen los resultados calculados de los parámetros de resistencia estimados para el macizo rocoso.

Progresiva	φ°	C (kPa)	m_b	s	σ_{cmi} (MPa)	E (MPa)	v
80+445	60	1,652	1,821	0,0112	113,04	19405	0,501
80+450	59	0,217	0,544	0,0005	83,00	4983	0,507
80+455	61	0,314	0,677	0,0008	91,00	6568	0,505

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda una continua medición de convergencia en el portal de salida del túnel Chacahuaro II, ya que en los registros tomados de campo con el extensómetro, muestra aun una convergencia activa.
- Se recomienda que, para realizar una evaluación del análisis tenso-deformacional de un macizo rocoso, se requiere conocer las propiedades de resistencia del macizo rocoso, propiedades elásticas, cinemáticas, los esfuerzos in-situ, la geometría de la excavación, y de las discontinuidades.
- Como consecuencia de la caída del túnel se recomienda realizar un modelo de sostenimiento tratado como talud y no como túnel, con pernos helicoidales, en dirección perpendicular a las fracturas paralelas de tal forma que amarraen todo el conjunto del dominio estructural, deberá ser perforados en seco, para evitar las pérdidas de las propiedades físicas - mecánicas en las fracturas producto del lubricado con lechada, en el portal de salida del Túnel Chacahuaro II.
- Se recomienda en la parte alta del talud a la altura de la línea férrea, hacer evaluaciones geológicas y geotécnicas específicas, para determinar la estabilidad del macizo rocoso, para descartar que el talud completo de la zona, está comprometida a deformación.

- Se recomienda que, para calcular las condiciones de estabilidad en un proceso constructivo del portal de salida del túnel Chacahuaró II; realizar el ensayo de “Over Coring”, para obtención de esfuerzos principales insitu reales, que debido al alto costo no se ejecutan.

BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, N. (2005).** The Q-System of rock mass classification. Curso dictado en la UNI.
- BARTON, N. (1999).** “General report concerning some 20th century lessons and 21st century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment”. 9th ISRM. Paris.
- BARTON, N. & BANDIS, S. (1982).** “Effects of block size on the shear behaviour of Jointed rocks”. 23rd us symp. On rock mechanics, vol. 10, pp. 739-760. Ed. Balkema.
- BARTON, N. & GRIMSTAD, E. (1994).** “The Q-system following 20 years of application in Namt support selection”. 43rd colloquy, salzburgo. Felsbau. 6/94, pp. 428-436.
- BARTON, N., LIEN, R. Y LUNDE, J. (1974).** “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support”. Rock mechanics (6) 4, pp. 189-236.
- BIENIAWSKI, Z. (1975).** The Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol. Sept., 1975, pp. 1-11.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1989).** Engineering Rock Mass Classifications, Wiley New York, 251 p.
- BROWN, E.T. (1999).** “The evolution of support and reinforcement philosophy and practice for underground mining excavations”. Rock support and reinforcement practice in mining, pp. 3- 17. Ed. Balkema.
- BROWN, E., BRAY, J.W., LADANYI, B & HOEK, E. (1983).** “Ground response curves for rock tunnels”. J. Of geotechnical engineering, vol 109, n° 1, pp. 15-39.
- CARRANZA-TORRES, C. & FAIRHURST, C. (1999).** “The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that obey the hoek-brown failure criterion”. Int. J. Of rock mech. Sci. & geom. Abstr. Vol. 36, no.5.
- CARRANZA-TORRES, C. (1998).** “Self-similarity analysis of the elasto-plastic response of underground openings in rock and effects of practical variables”. Ph. D. Thesis. University of minnesota.
- CARNICERO, A. (2001).** “Introducción al Métodos de los Elementos Finitos”. 2001, pp 1-25.

- CHAPRA, E. & CANALE, R. (2006).** “Métodos Numéricos para Ingenieros”. vol 1, nº 5, pp 731.
- CUBO, J. (2010).** Aplicación del “Análisis por elementos finitos en la Ingeniería Naval, 2010, pp. 13-37.
- DAMES & MOORE. (1977)** Rock Mechanics Field & Laboratory Manual of Technical Practice. Publicación Interna (1977).
- DEERE, D., HENDRON, A., PATTON, F., & CORDING, E. (1967).** Design of surface and near surface construction in rock. In failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc.Min.Engr, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- DEVIANDES S.A.C (2012).** “Estudio Definitivo Diseño de Túneles, Variante Chacahuaro II” de Ingeniería para Obras Excepto Obras De Puesta A Punto, Tramo 2: Puente Ricardo Palma–La Oroya, La Oroya–Huancayo Y La Oroya-Dv.Cerro De Pasco De La Carretera Iirsa Centro”. Mayo 2012, 250 págs.
- DEVIANDES S.A.C (2012).** “Especificaciones Técnicas para Túneles, Variante Chacahuaro II” Contrato de Concesión, Tramo 2: Puente Ricardo Palma–La Oroya, La Oroya–Huancayo Y La Oroya-Dv.Cerro De Pasco De La Carretera Iirsa Centro”. Mayo 2012, 150 págs.
- DONALD, V.K. & HAAKON, D.P. (2010).** Correlation Between Point Load Index and Compressive Strength for Quartzite Rocks. Geotechnical and Geological Engineering, 1993, 11, pp. 269-272.
- D. F. COATES & T.S. COCHRANE (1970),** Development of design specifications for rock bolting in Canadian Mines, research Report R224, Mines Branch, Ottawa.
- FAIRHURST, CH. (1991).** “General philosophy of support design for underground structures in hard rock”. Underground structures: design and construction. Developments in geotechnical engineering series, 59b. Ed. R. S. Sinha, elsevier.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I; FERRER, MERCEDES; ORTUÑO, LUIS; OTEO, CARLOS (2002).** Ingeniería Geológica. Pearson Educación S.A., 715 págs.

- HOEK, E. Y BROWN, E.T. (1980).** "Underground excavations in rock". Imm. Ed. Chapman & hall. Londres, RU.
- HOEK, E. & DIEDERICHS, M. (2006).** Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43, pp. 203-215.
- INGEMMET - Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (1981).** Estudio geológico-tectónico del área de Matucana, Octubre 1981, 71 págs.
- INGEMMET - Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (1970).** Geología del cuadrángulo de Matucana. Hojas 24-m. Boletín No 48. Serie A: Carta Geológica Nacional, Diciembre 1970.
- ISRM. (2007).** The Blue Book: "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006", Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson (2007).
- JING, A. (2002).** "Clasificación de los Métodos Numéricos Adaptado". 2002, pp 34-48.
- LOPEZ J. C. & VARIOS, (1998).** Ingeo Túneles: Ingeniería de Túneles, Libro 1, editorial Entorno Grafico S. L., primera edición. Madrid – España, 459 pp.
- LÓPEZ JIMENO, C. (1998).** Manual de ingeniería de túneles. __ Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. 1081 p.
- MARINOS, P AND HOEK, E. (2000)** GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.
- OBERT N, Y DUVALL, N.I. (1967).** "Rock Mechanics and the design os structures in rock". John Wiley&sons. Nueva York.
- PANDE, G.N., BEER, G, Y WILLIAMS, J.R. (1990).** "Numerical Methods in Rock Mechanics". John Wiley & Sons, Ltd. New-York.
- RODRIGUEZ ILLACHURA, H. (2015).** "Método de elemento finito aplicado al análisis de excavaciones subterráneas y superficiales en macizos rocosos" n°12, pp. 9-11.
- ROCSCIENCE, (2002).** Rocscience software. <http://www.rocscience.com/roc/software/software.asp>.

- RUSNAK, J.A. (1998)** Application of the Coal Mine Roof Rating, Derived from Drill Core, In the Roof Support Design of a Coal Belt Conveyor Tunnel. Proc. of the 17th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV, 1998, pp.221-230.
- SHEORY, P. (1994).** “A theory for insitu stresses in isotropic and transversely isotropic rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31(1), 23-24.
- STEPHANSSON, B.M. (1997).** Evaluation of the Point Load Strength for Soft Rock Classification. Proceeding of the 4th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV, 1997, pp. 220-226
- STEVEN, F. (2010).** “Numerical Methods in Geotechnical Engineering”. Ph. D., P.E. Associate Professor. University of Utah.
- TURNER, CLOUGH, MARTIN & TOPP (1956).** Stifness and deflection analysis of complex structures”. Journal of Aeronautical Sciences, 23, 805-824. 1956.
- VALLEJO, L.E.; WALSH, R.A.; ROBINSON, M.K. Correlation. (1989).** between unconfined compressive and Point Load Strength for Appalachian Rocks. Proceeding of the 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1989, pp. 461-468.
- ZIENKIEWICZ, O. (1968).** "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics". M^cGraw-Hill Pub. London.
- ZIENKIEWICZ & TAYLOR (1994).** El método de los Elementos Finitos”. Mc Graw-Hill. CIMNE. Barcelona.

ANEXOS

ANEXO 01

REGISTROS DE LEVANTAMIENTOS GEOMECÁNICOS

- PROGRESIVA “80+445”**
- PROGRESIVA “80+450”**
- PROGRESIVA “80+455”**

- PROYECTO: Chacahuero
- MATERIAL: Caliza
- OBSERVACIONES: 80+446 pino 16 de Septiembre del 2016 Rumbo de la excavación N63° E

R.M.R. - ROCK MASS RATING - (Bieniawski 1.989)

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN:

RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA: Puntuación: 12

Índice de resistencia por ensayo de carga puntual [MPa]	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	(Para estas ordenes bajo es preferible utilizar el ensayo de compresión uniaxial)		
Resistencia a la compresión simple [MPa]	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
VALORACIÓN:	15	12	7	4	2	1	0
MARCADOR:	X						

ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES:

Puntuación: 14

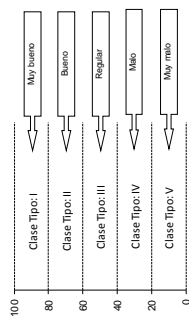
1º METODO:	Puntuación	2º METODO:	Puntuación
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorizar.	30	Muy rugosas. Débilmente rugosas. Apertura < 1mm. Labios débilmente meteorizados.	25
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorizar.	30	Superficies con señales de deslizamientos o relleno < 5mm de espesor o apertura > 5mm.	20
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorizar.	30	Superficies con señales de deslizamientos o relleno > 5mm de espesor o apertura > 5mm.	10
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorizar.	30	Continua.	0
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorizar.	30		X

2º METODO:

Longitud de la discontinuidad (Persistencia) [m]	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	Puntuación PARCIAL:
VALORACIÓN:	6	4	2	1	0	14
MARCADOR:			X			
VALORACIÓN:	0	< 0.1	0.1 - 1.0	1 - 5	> 5	
MARCADOR:				X		
Rugosidad:	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espesq. de bala	
VALORACIÓN:	6	5	3	1	0	
MARCADOR:			X			
Relleno:	Ninguno	Duro con espesor < 5mm	Blando con espesor > 5mm	Blando con espesor > 5mm	Blando con espesor > 5mm	
VALORACIÓN:	6	4	2	0	0	
MARCADOR:	X					
Estado de meteorización:	No asignado	Ligero	Modoado	Alto	Descapustado	
VALORACIÓN:	0	3	3	1	0	
MARCADOR:			X			

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO:

R.M.R. _{BASECO} =	56
R.M.R. _{RP} =	44
CLASE:	III
DESCRIPCIÓN:	Regular



OBTENCIÓN DEL ÍNDICE G.S.I.:

GSI = 59

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES:

Cohesión: c = 200-300 [MPa]
 Ángulo de rozamiento: φ = 25-35 [°]

- Bieniawski, 1.979. Q = 1.000
- Abad et al., 1.983. Q = 1.233
- Moreno E., 1.980. Q = 0.126
- Rutledge y Preston, 1.980. Q = 1.185
- Cameron Clark y Budavari, 1.981. Q = 0.035
- Kaiser y Gale, 1.985. Q = 2.883

R.Q.D.:

Puntuación: 13

R.Q.D.	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25
VALORACIÓN:	20	17	13	8	3
MARCADOR:			X		

SEPARACIÓN DISCONTINUIDADES:

Puntuación: 10

Separación entre discontinuidades [m]	> 2	2 - 0.6	0.6 - 0.2	0.2 - 0.06	< 0.06
VALORACIÓN:	20	15	10	8	5
MARCADOR:			X		

PRESENCIA DE AGUA:

Puntuación: 7

Caudal en 10m de túnel [litros/minuto]	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta / Temperatura principal máxima [5w/25.1]	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
Condiciones generales:	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Gotando	Flojando
VALORACIÓN:	15	10	7	4	0
MARCADOR:			X		

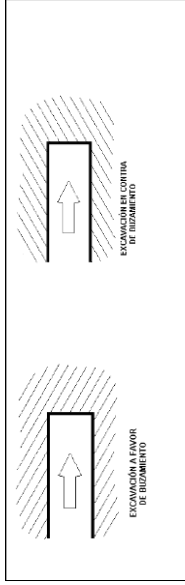
AJUSTE DE VALORES POR LAS ORIENTACIONES DE LAS DISCONTINUIDADES:

Corrección: -12

Túneles	Favorable	Medio o regular	Desfavorable	Muy desfavorable
VALORACIÓN	0	2	10	12
MARCADOR	X			
Corrección	0	2	7	15
MARCADOR			X	
Trilugas	0	-5	-23	-30
MARCADOR			X	

Criterio en túneles:

DIRECCIÓN:	Excavación a favor de buzamiento	Excavación en contra de buzamiento	Paralela al eje del túnel	Cualquier dirección
BUZAMIENTO:	90-45° favorable	45-20° favorable	90-45° Medio	20-0° Medio
Clase	Favorable	Desfavorable	Muy desfavorable	Medio



- PROYECTO: Chacahuero
- MATERIAL: Caliza
- OBSERVACIONES: 80-450 prog 23 de Septiembre del 2016 Rumbo de la excavación N52° E

R.M.R. - ROCK MASS RATING - (Bieniawski 1.989)

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN:

RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA- PUNTAJACIÓN: 7

Índice de resistencia por ensayo de carga puntal (MPa)	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	(Para estos últimos tres valores se debe utilizar el valor de comparación unitario)		
Resistencia a la compresión simple (MPa)	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
VALORACIÓN:	15	12	7	4	2	1	0
MARCADOR:			X				

ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES- PUNTAJACIÓN: 14

1º MÉTODO:	PUNTAJACIÓN:	2º MÉTODO:	PUNTAJACIÓN:
Muy rugosas. Sin continuidad. Sin separación. Labios sanos sin meteorizar.	30	Muy rugosas. Débilmente rugosas. Apertura < 1mm. Labios débilmente meteorizados.	20
VALORACIÓN:	25	VALORACIÓN:	14
MARCADOR:		MARCADOR:	

SEPARACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES- PUNTAJACIÓN: 8

Separación entre discontinuidades [m]	> 2	2 - 0.6	0.6 - 0.2	0.2 - 0.06	< 0.06
VALORACIÓN:	20	15	10	8	5
MARCADOR:				X	

PRESENCIA DE AGUA- PUNTAJACIÓN: 7

Cantidad en 10m de túnel (litros/minuto)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Relación presión de agua en la junta / (Espesor de la junta x área de la junta) <td>0</td> <td>< 0.1</td> <td>0.1 - 0.2</td> <td>0.2 - 0.5</td> <td>> 0.5</td>	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
VALORACIÓN:	15	10	7	4	0
MARCADOR:			X		

AJUSTE DE VALORES POR LAS ORIENTACIONES DE LAS DISCONTINUIDADES: CORRECCIÓN: -12

DIRECCIÓN:	Excavación a favor de buzamiento	Excavación en contra de buzamiento	Perpendicular al eje del túnel	Paralela al eje del túnel	Cualquier dirección
VALORACIÓN:	0	2	0	-10	-12
MARCADOR:	X				
Túneles:	0	-2	-5	-7	-15
Taludes:	0	-5	-25	-50	-60
MARCADOR:				X	X

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO:

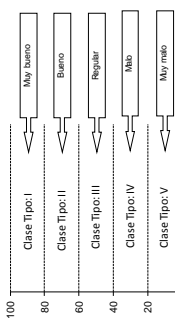
R.M.R. BASICO = 44
R.M.R. RS = 32
CLASE: IV
DESCRIPCIÓN: Malo

OBTENCIÓN DEL ÍNDICE G.S.I.: GSI = 47

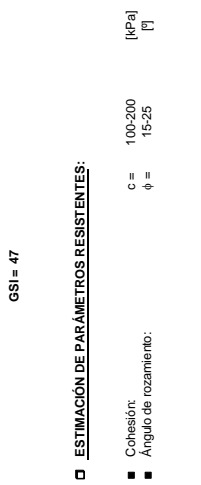
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES:

Cohesión: c = 100-200 (KPa)
Ángulo de rozamiento: φ = 15-25 (°)

- Bieniawski, 1.979. Q = 0.264
- Abad et al., 1.983. Q = 0.393
- Moreno E., 1.980. Q = 0.014
- Rutledge y Preston, 1.980. Q = 0.155
- Cameron Clark y Budavari, 1.981. Q = 0.003
- Kaiser y Gale, 1.985. Q = 0.703



OBTENCIÓN DEL ÍNDICE Q:



- PROYECTO: Chacabuarro
- MATERIAL: Caliza
- OBSERVACIONES: 80+455
28 de Setiembre del 2016 Rumbo de la excavación N83° E

R.M.R. - ROCK MASS RATING - (Bieniawski 1.989)

PARAMETROS DE CLASIFICACIÓN:

RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA:

PUNTAJACIÓN: 12

Índice de resistencia por ensayo de carga puntual [MPa]	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	(Para estas órdenes bajas es preferible utilizar el ensayo de compresión uniaxial)	< 1
Resistencia a la compresión simple [MPa]	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1
VALORACIÓN:	15	12	7	4	2	1
MARCADOR:	X					0

ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES:

PUNTAJACIÓN: 13

1º MÉTODO:

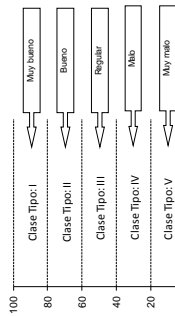
Muy rugosas. Sin continuidad. Labios sanos sin meteorización.	30	25	20	15	10	5
Débilmente rugosas. Apertura < 1mm. Labios débilmente meteorizados.	25	20	15	10	5	0
Superficies con señales de deslizamientos o relleno < 5mm de espesor, o apertura 1 - 5mm.	10	5	0	0	0	0
Superficies con señales de deslizamientos o relleno > 5mm de espesor o apertura > 5mm.	0	0	0	0	0	0
Continúa.	0	0	0	0	0	0

2º MÉTODO:

Logitud de la discontinuidad (Persistencia) [m]	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	
VALORACIÓN:	6	4	2	1	0	
MARCADOR:				X		
Apertura [mm]	0	< 0.1	0.1 - 1.0	1 - 5	> 5	
VALORACIÓN:	6	5	4	3	2	
MARCADOR:				X		
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Espeso de la roca	
VALORACIÓN:	6	5	4	3	2	
MARCADOR:				X		
Relleño	Ninguno	Duro con espesor < 5mm	Blando con espesor < 5mm	Blando con espesor > 5mm	Discontinuo	
VALORACIÓN:	6	4	3	2	1	
MARCADOR:				X		
Estado de meteorización	No afectado	Ligero	Modificado	Alto	Discontinuo	
VALORACIÓN:	6	5	4	3	2	
MARCADOR:				X		

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO:

R.M.R. BRUTO =	48
R.M.R. RR =	36
CLASE:	IV
DESCRIPCIÓN:	Malo



OBTENCIÓN DEL ÍNDICE G.S.I.:

GSI = 51

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES:

- Cohesión: c = 100-200 [kPa]
- Ángulo de rozamiento: φ = 15-25 [°]

OBTENCIÓN DEL ÍNDICE Q:

- Bieniawski, 1.973. Q = 0.411
- Abad et al., 1.983. Q = 0.576
- Moreno E., 1.980. Q = 0.029
- Rutledge y Preston, 1.980. Q = 0.305
- Cameron Clark y Budavari, 1.981. Q = 0.007
- Kaiser y Gale, 1.985. Q = 1.125

R.Q.D.:

PUNTAJACIÓN: 8

R.Q.D.	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25
VALORACIÓN:	20	17	13	8	3
MARCADOR:				X	

SEPARACIÓN DISCONTINUIDADES:

PUNTAJACIÓN: 8

Separación entre discontinuidades [m]	> 2	2 - 0.6	0.6 - 0.2	0.2 - 0.06	< 0.06
VALORACIÓN:	20	15	10	8	5
MARCADOR:				X	

PRESENCIA DE AGUA:

PUNTAJACIÓN: 7

Caudal en 10m de túnel, litros/minuto	Nulo	< 1.0	1.0 - 25	25 - 125	> 125
Relación: Presión del agua en la junta / Tensión principal máxima (C _{ov} /C ₃₀)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
Condiciones generales	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Mojado	Chorreado
VALORACIÓN:	15	10	7	4	0
MARCADOR:			X		

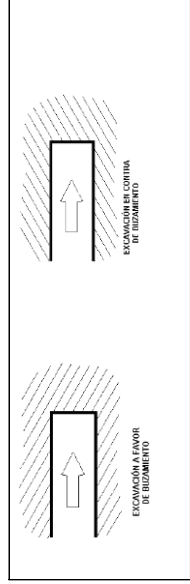
AJUSTE DE VALORES POR LAS ORIENTACIONES DE LAS DISCONTINUIDADES:

CORRECCIÓN: -12

Túneles	Muy favorable	Favorable	Medio o regular	Desfavorable	Muy desfavorable
VALORACIÓN	0	-2	-5	-10	-12
Orientación	0	-2	-7	-15	-25
Falladas	0	-5	-25	-50	-60
MARCADOR:				X	

Criterio en Túneles:

DIRECCIÓN:	Excavación a favor de buzamiento	Excavación en coma de buzamiento	Excavación al eje del túnel	Excavación en dirección
BUZAMIENTO:	90°-45°	45°-20°	90°-45°	45°-20°
	Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable
	0	-2	-5	-10
	0	-2	-7	-15
	0	-5	-25	-50
			X	



ANEXO 02

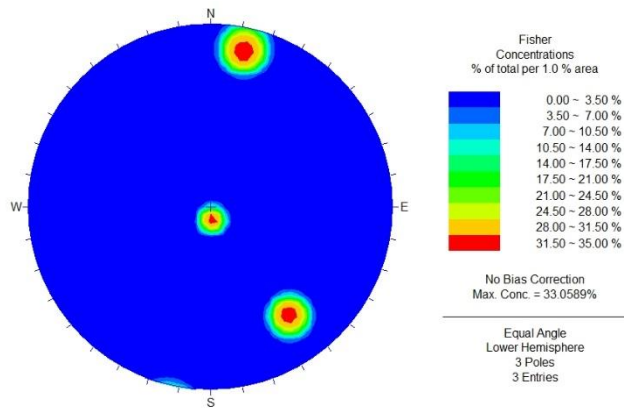
PROYECCIONES ESTEREOGRAFICAS

- PROGRESIVA "80+445"**
- PROGRESIVA "80+450"**
- PROGRESIVA "80+455"**

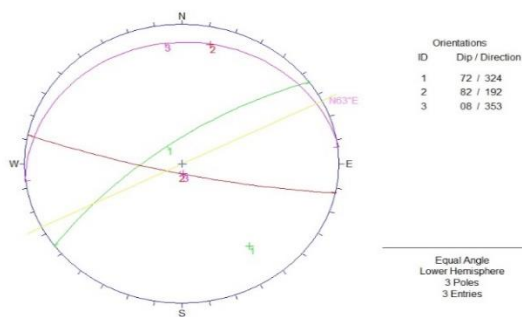
Macizo rocoso Progresiva 80 + 445



La roca del macizo rocoso es: Caliza



Densidad de polos

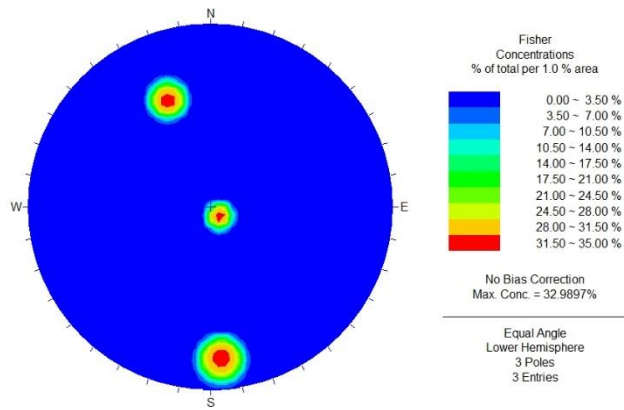


Planos mayores y el rumbo de la excavación: N 63° E

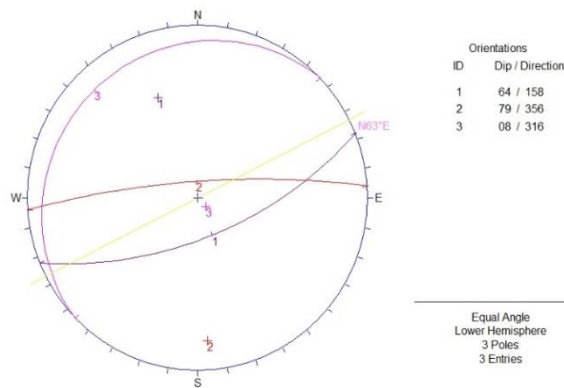
Macizo rocoso Progresiva 80 + 450



La roca del macizo rocoso es: Caliza



Densidad de polos

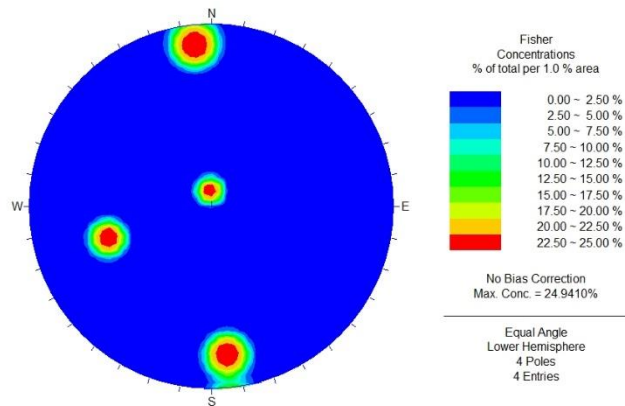


Planos mayores y el rumbo de la excavación: N 63° E

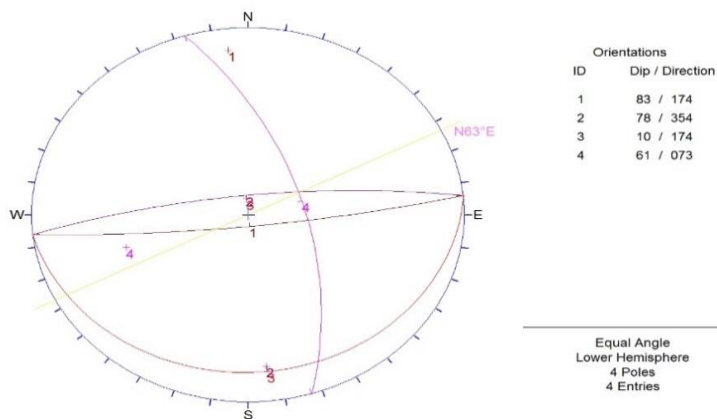
Macizo rocoso Progresiva 80 + 455



La roca del macizo rocoso es: Caliza



Densidad de polos

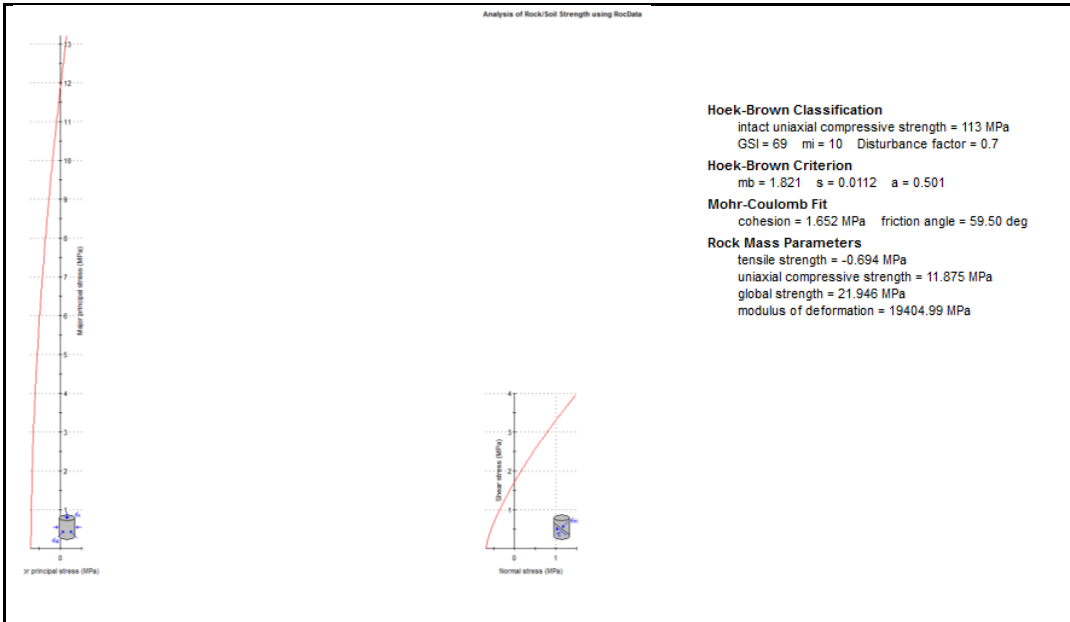


Planos mayores y el rumbo de la excavación: N 63° E

ANEXO 03

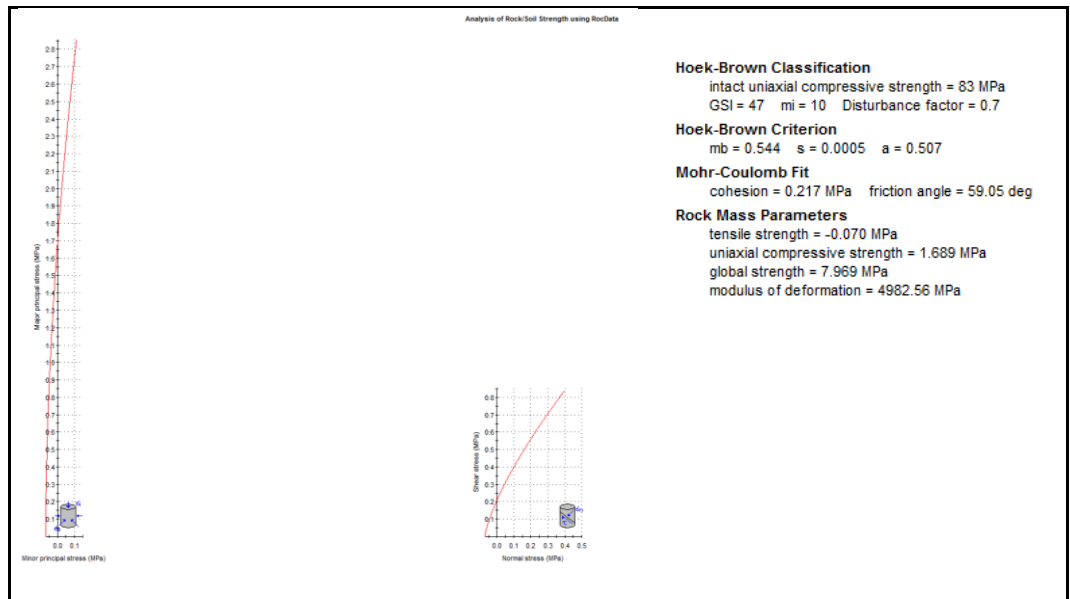
CÁLCULO DE LA PROPIEDADES ELÁSTICAS Y DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

- PROGRESIVA “80+445”**
- PROGRESIVA “80+450”**
- PROGRESIVA “80+455”**



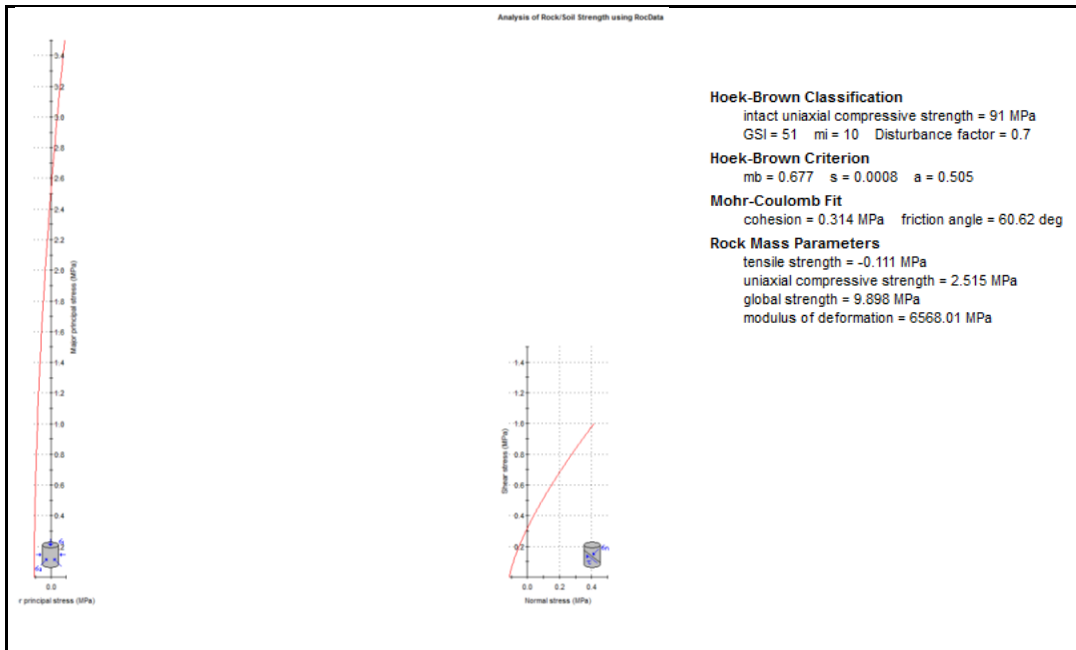
JM.I01_Cálculo de las propiedades elásticas.

"PROGRESIVA KM. 80+445"



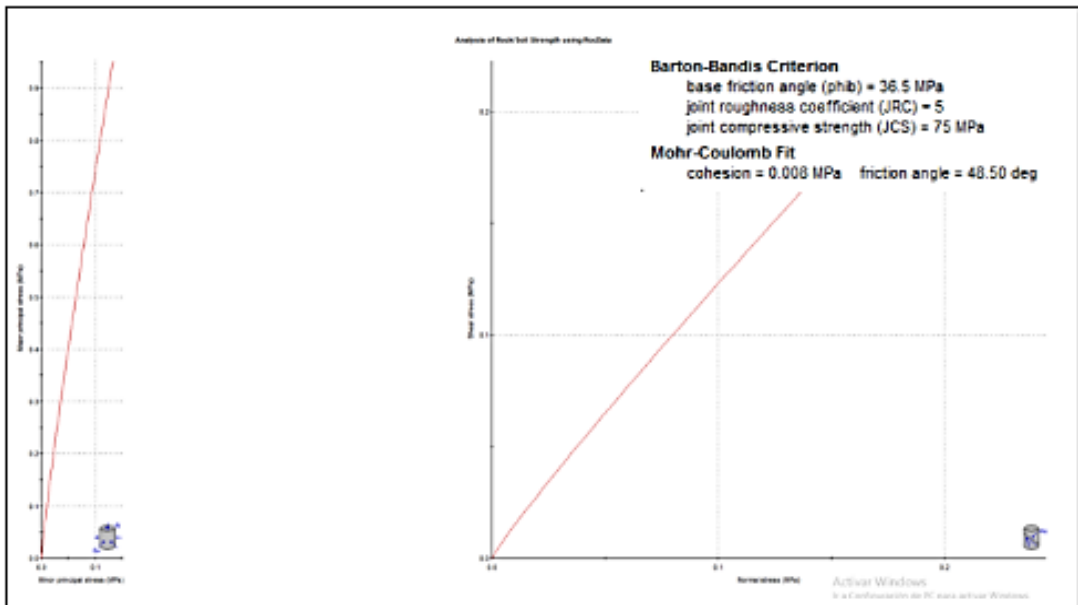
JM.I02_Cálculo de las propiedades elásticas.

"PROGRESIVA KM. 80+450"



JM.I03_Cálculo de las propiedades elásticas.

"PROGRESIVA KM. 80+455"





JM.I04_Cálculo de las propiedades de las fracturas.

"PROGRESIVA KM. 80+445 al KM. 80+455"

ANEXO 04

DESCRIPCION PETROGRÁFICA DEL MACIZO ROCOSO - MUESTRA DEL PORTAL DE SALIDA DEL TÚNEL CHACAHUARO II

		IDENTIFICACION PETROGRAFICA DE ROCAS		MUESTRA: JMG - 01	
DESCRIPCION DE MUESTRA: Roca sedimentaria de color gris oscuro, afanítica; compuesta principalmente de carbonato de calcio.					
TEXTURA DE MUESTRA: BANDEADA DE GRANOS FINOS			OBSERVACIONES DE MUESTRA: La muestra presenta impurezas ya que mantiene un decoloramiento gris oscuro por arcillas y pátinas de óxido de hierro. Produce efervescencia en ácido clorhídrico.		
DESCRIPCION MINERALOGICA	COLOR		GRIS OSCURO		
	ESTRUCTURA		TRIGONAL		
	TEXTURA		BANDEADA DE GRANO FINO		
	TIPO DE ROCA		SEDIMENTARIA		
	TAMAÑO DE FRAGMENTOS		>2mm		
	FORMA DE LOS FRAGMENTOS		GRANILLOS FINOS		
	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA		CARBONATO DE CALCIO, GOETITAS.		
					
CLASIFICACION DE ROCA					
CALIZA					

ANEXO 05
ENSAYOS DE LABORATORIO
- ENSAYO DE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS.



ENSAYO DE PROPIEDADES FÍSICAS

Los ensayos se realizaron según los métodos sugeridos por la ISRM (1979)*.

Los resultados son los siguientes:

MUESTRA	PROGRESIVA	SUB MUESTRA	POROSIDAD APARENTE (%)	ABSORCIÓN (%)	VOLÚMEN DE VACÍOS	PESO UNITARIO (KN/m ³)	PESO UNITARIO PROMEDIO
JM-01 CHACHAHUARO	80+450	A	5.14	0.19	0.33	20.8	21.1
		B	5.68	0.24	0.6	21.1	
		C	5.51	0.22	0.44	21.5	

*Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v.16, n.2, p. 141-156.

Fecha de emisión : Lima, 05 de octubre del 2017

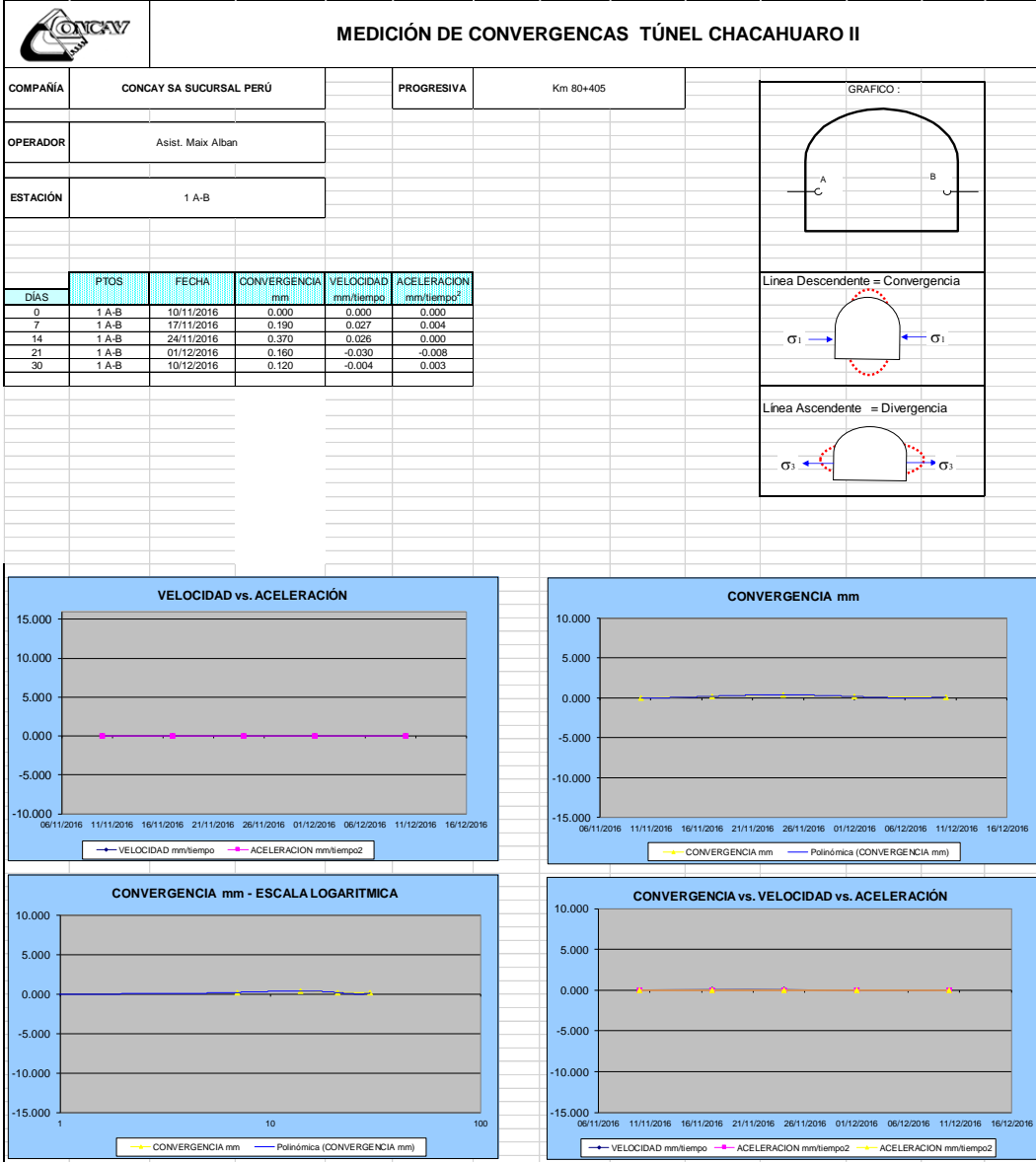
El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida. LABORATORIO GEOTECNICO
Muestra JM-01 TUNEL CHACHAHUARO II PROGRESIVA 80+450

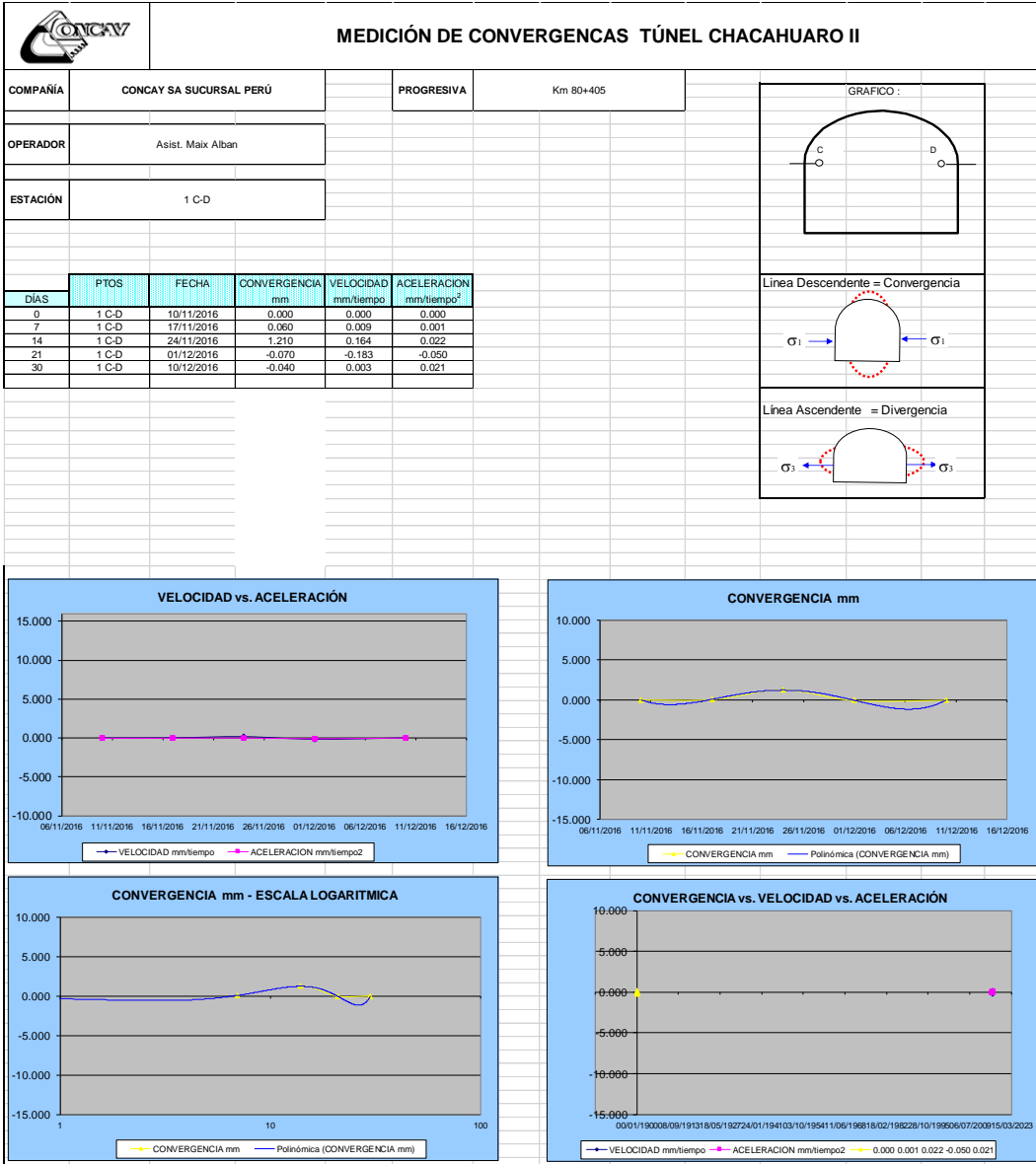

TECNICO LABORATORISTA
BRAULIO JUNCO BARRIOS
LABORATORIO PUCP

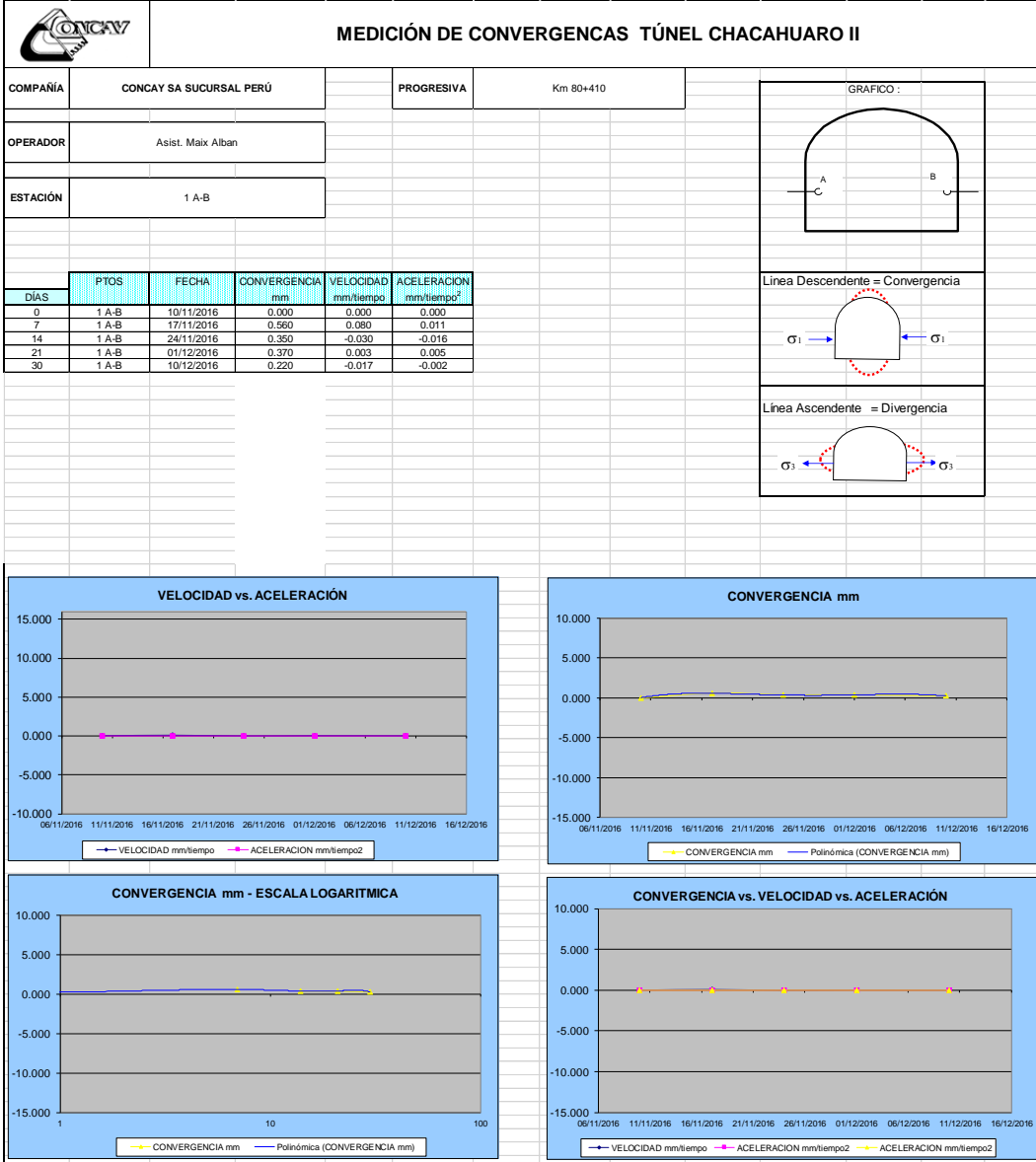

ROBERTO TELLO BARBARAN
ING. CIVIL - REG. CIP 67646
LABORATORIO PUCP

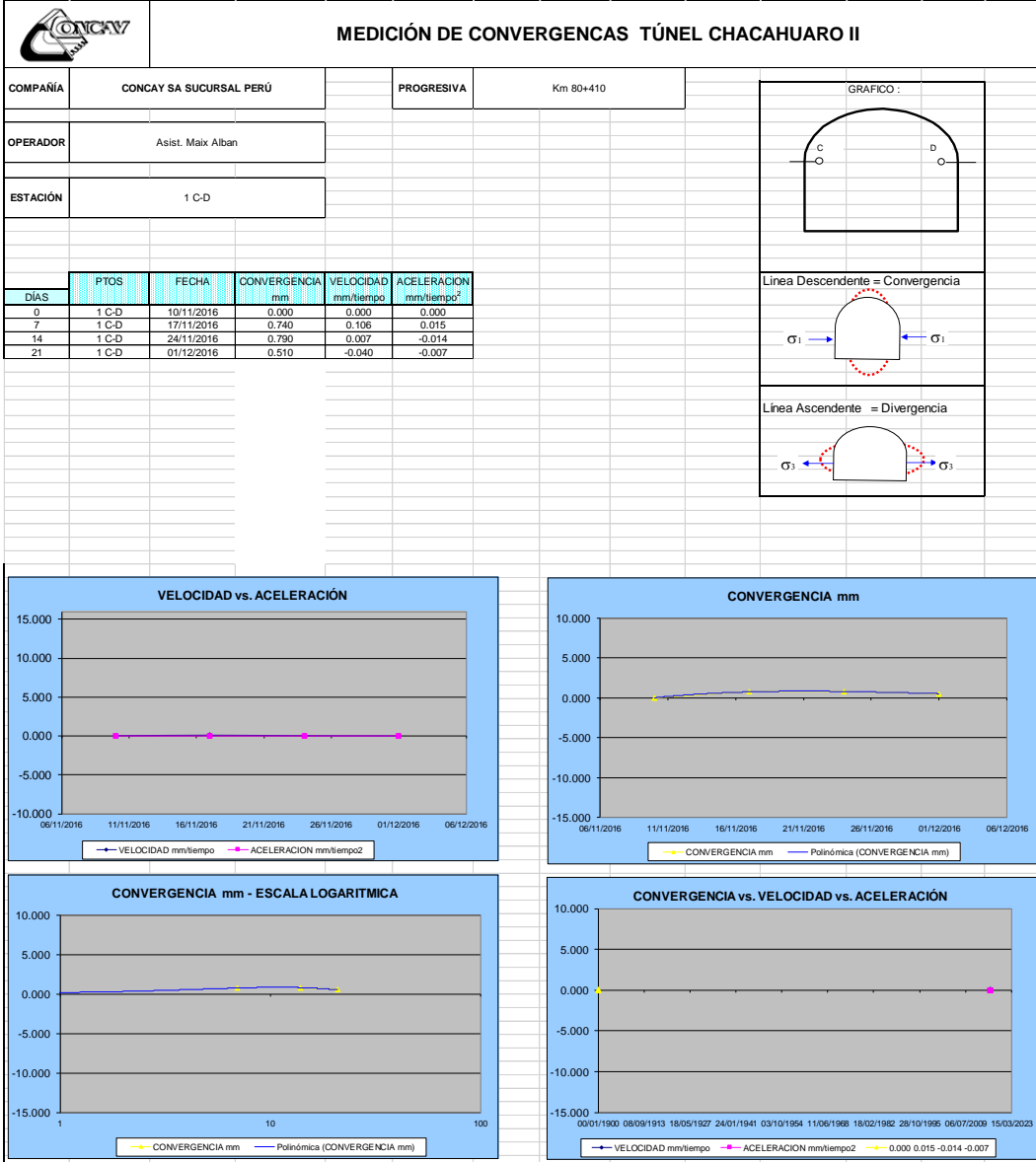
ANEXO 06

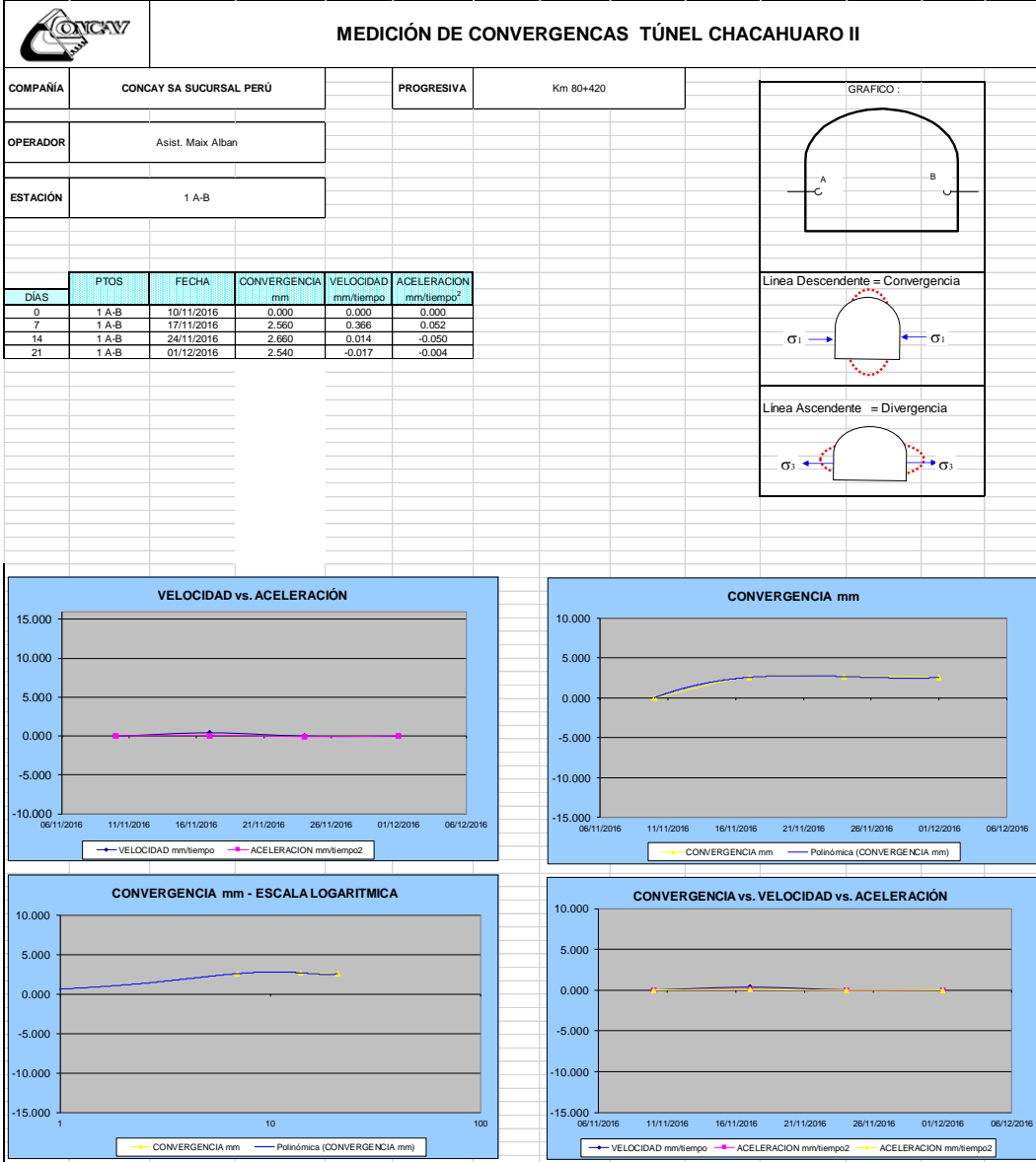
MEDICIONES DE PUNTOS DE CONVERGENCIA

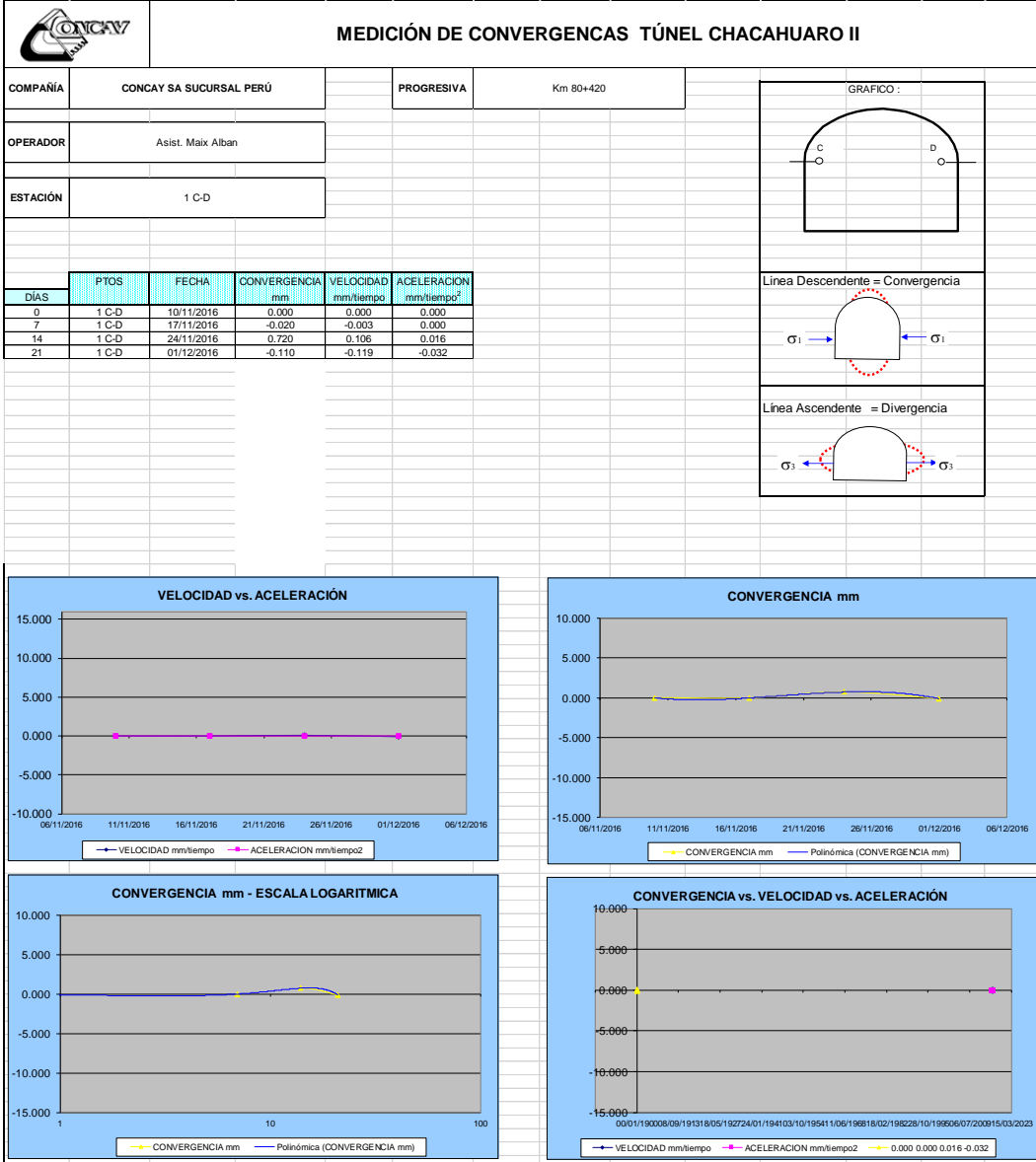


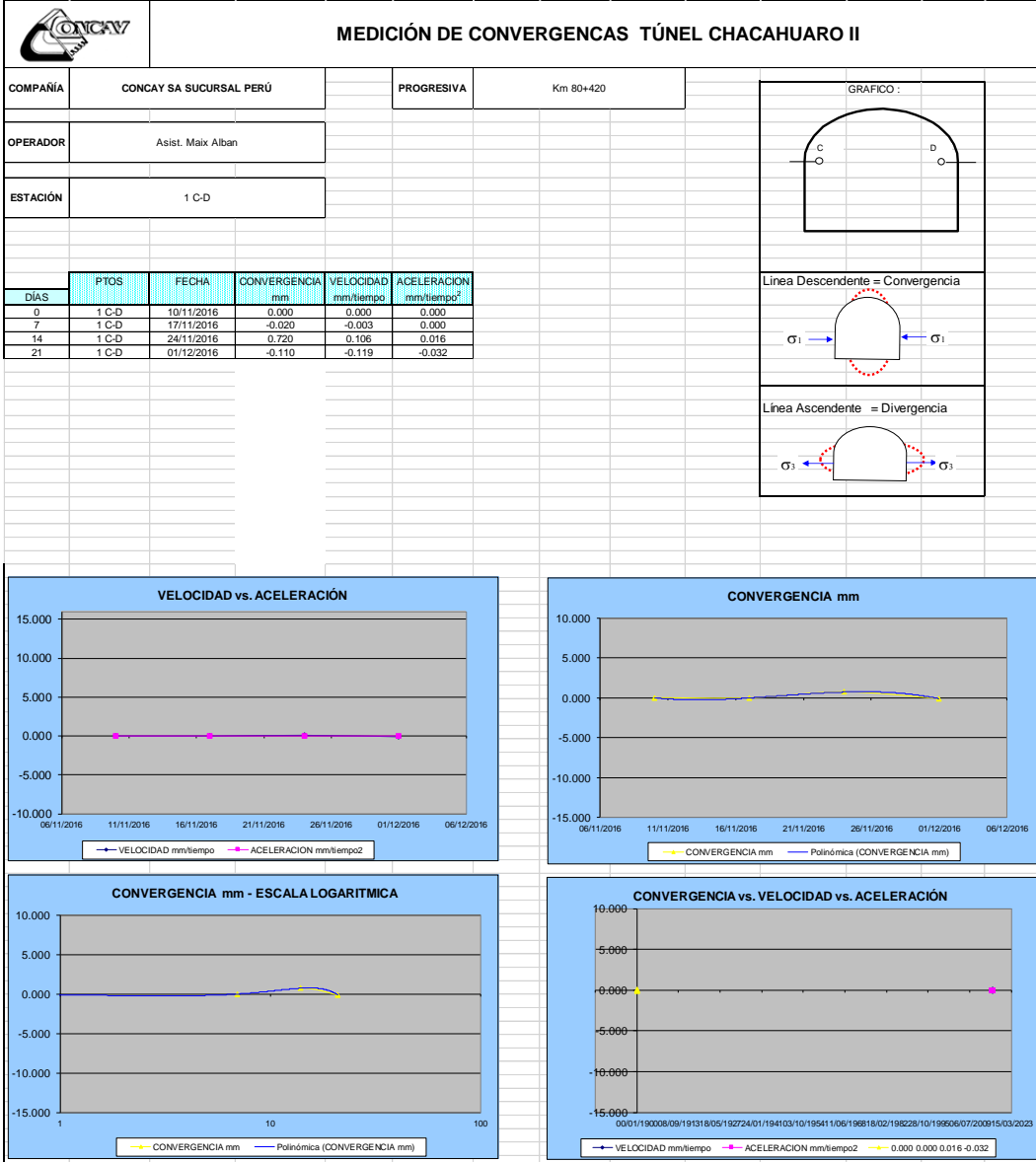


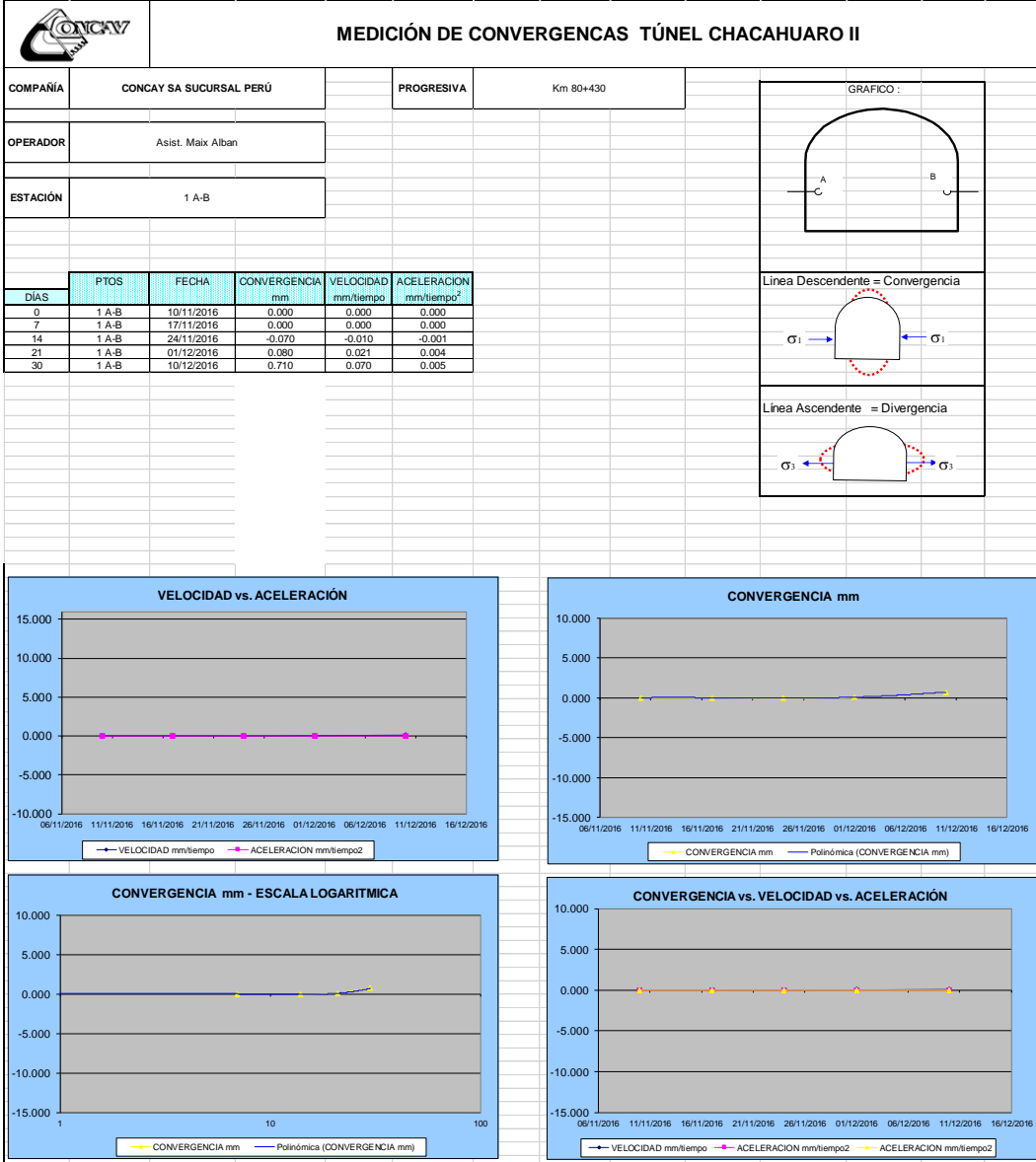


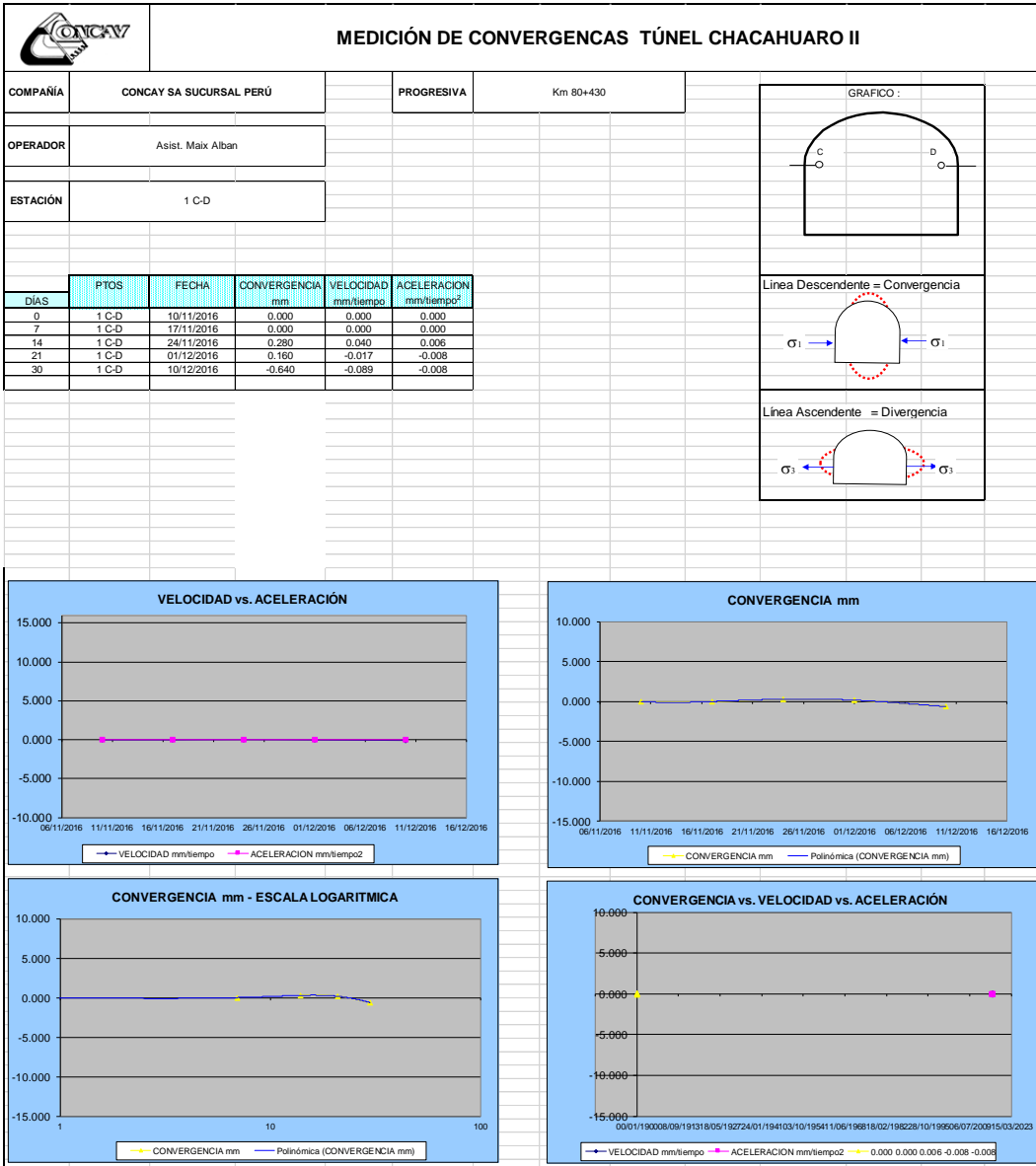












ANEXO 07

PANEL FOTOGRÁFICO



JM.I05_Vista del portal de salida del Túnel Chacahuaro II, Se muestra al macizo rocoso constituido por roca caliza y suprayaciendo depósitos coluviales y fluviotorrenciales.

"PROGRESIVA KM. 80+485"



JM.I06_Medición de Buzamiento y Dirección de buzamientos, a los sistemas de familias de fracturas, del portal de salida del Túnel Chacahuaro II.

"PROGRESIVA KM. 80+445"



JM.I07_Mapeo por celdas, para determinar las propiedades físicas y cinemáticas, del macizo rocoso al portal de salida del Túnel Chacahuaro II.

"PROGRESIVA KM. 80+450"



JM.I08_ Levantamiento topográfico, para verificar el rumbo del túnel en el proceso constructivo.

"PROGRESIVA KM. 80+435 al KM. 80+460"



JM.I09_Sostenimiento con shotcrete y cerchas espaciadas cada 1m, al sistema de fracturas paralelas al eje del portal de salida del Túnel Chacahuaro II.

"PROGRESIVA KM. 80+460"



JM.I10_Finalización del Portal de Salida - Túnel Chacahuaro II.

"PROGRESIVA KM. 80+465"

ANEXO 08

MAPAS Y PLANOS

MU-01 ± MAPA DE UBICACIÓN

PT01 ± PLANO TOPOGRÁFICO EN PLANTA

ST-01 ± SECCIONES TRANSVERSALES DE SALIDA

ST-02 ± SECCIONES TRANSVERSALES DE SALIDA

MGR-01 ± MAPA GEOLÓGICO REGIONAL

MGL-01 ± MAPA GEOLÓGICO LOCAL

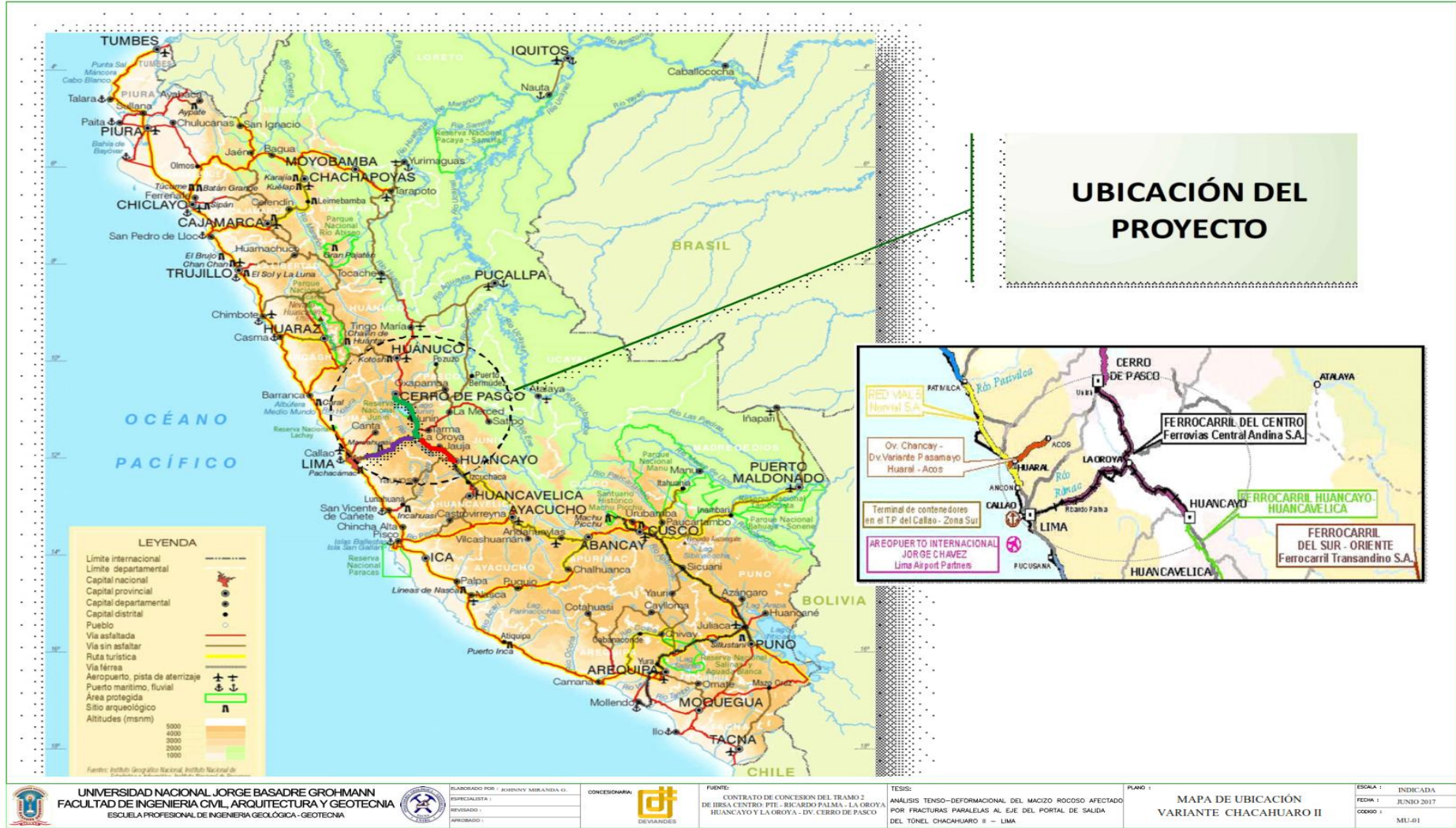
MGR-02 ± MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

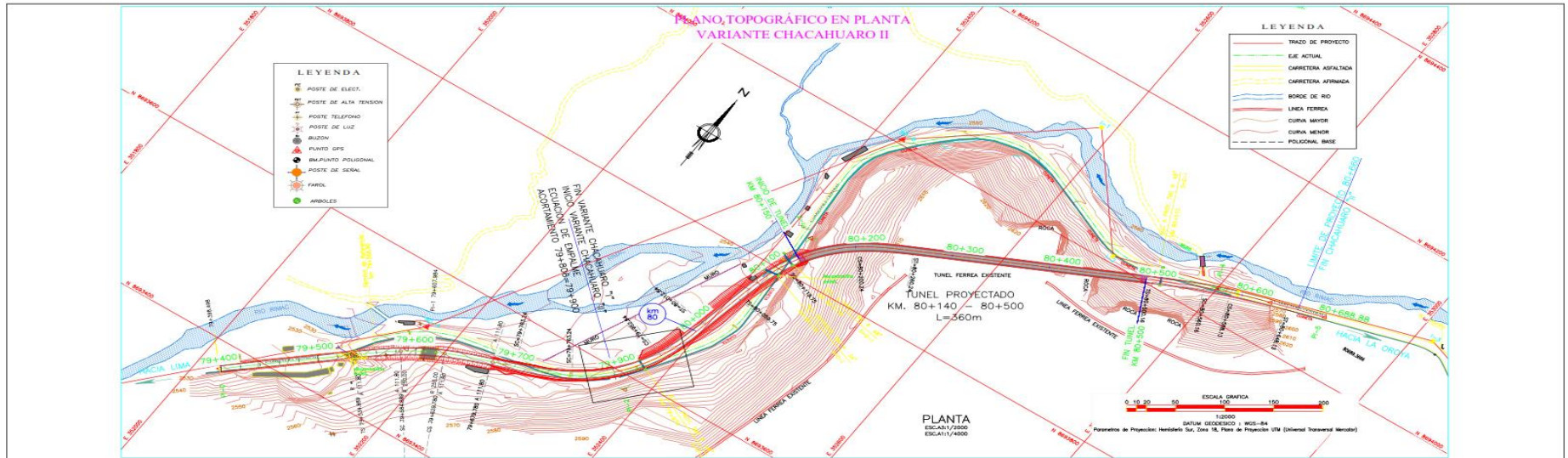
MGL-02 ± MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL

MGER-01 ± MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL REGIONAL

MGEL-01 ± MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL LOCAL

CGL-01 ± CORTE GEOLÓGICO LONGITUDINAL

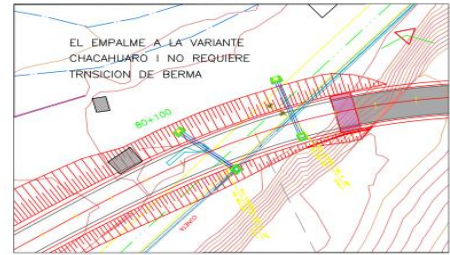




CUADRO DE COORDENADAS Y ELEMENTOS DE CURVAS

Nº PI	SENT.	DELTA	RADIO	TANG.	L.C.	Ext.	P.L.	P.C.	P.T.	NORTE	ESTE	PK	SA	x	y	p	k	ST	LT	TS	ST			
0	I	-----	0,000	0,000	0,000	0,000	79 + 491,951	79 + 491,951	79 + 491,951	8693370,203	352024,917	0,0	0,00											
1	D	21°45'20"	250,000	22,506	44,892	0,611	79 + 607,40	79 + 584,89	79 + 639,78	86934506,682	352180,735	5,0	0,00	6°02'33"	40,000	59,914	2,398	0,000	29,986	20,027	40,030	78,143	79 + 604,819	79 + 799,746
2	I	59°24'29"	150,000	48,486	95,969	7,852	79 + 905,040	79 + 763,240	79 + 952,840	86935064,885	352377,773	5,0	1,10	11°32'33"	40,000	60,568	3,989	0,999	29,960	19,872	40,084	116,193	79 + 789,503	80 + 005,121
3	D	53°38'50"	150,000	41,240	80,482	5,566	80 + 146,093	80 + 119,752	80 + 200,244	86935850,367	352423,872	5,0	1,10	11°32'33"	40,000	59,760	3,989	0,999	29,960	20,077	40,084	106,241	80 + 059,752	80 + 265,244
4	D	10°04'30"	500,000	13,988	27,969	0,196	80 + 574,283	80 + 540,162	80 + 588,131	8694037,027	352800,838	3,0	0,50	3°28'18"	40,000	59,978	1,200	0,300	29,996	20,007	40,008	74,121	80 + 500,162	80 + 648,131
5	-----	-----	-----	-----	-----	-----	80 + 688,884	-----	-----	8694069,231	352910,806	0,0	0,00											

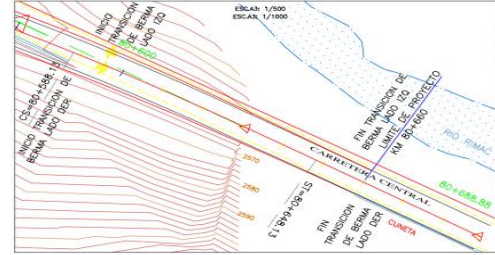
DETALLE DE TRANSICION DE BERMA INICIO DE VARIANTE



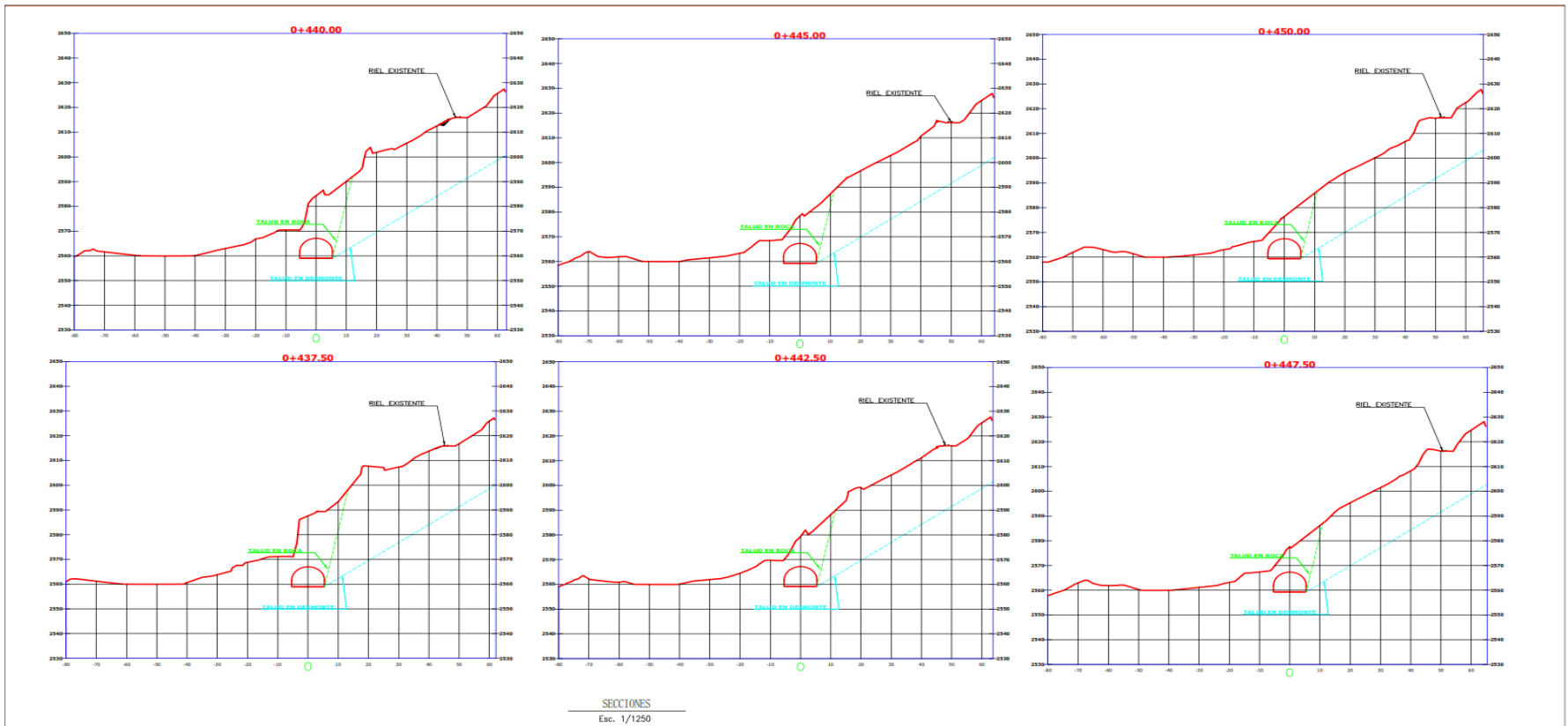
PUNTOS GEOREFERENCIACION

PUNTOS	NORTE	ESTE	COTA
80-A	8693533,527	352166,540	2538,323
80-B	8694006,243	352429,123	2552,044
I-1	8694134,949	352586,748	2577,678
I-2	8694008,589	352689,329	2562,584

DETALLE DE TRANSICION DE BERMA FIN DE VARIANTE



NOTA: LOS PIS Y BMS, ESTAN SEÑALADOS EN EL TERRENO CON PINTURA DE COLOR ROJO EN FONDO BLANCO



SECCIONES
Esc. 1/1250



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNIA



ELABORADO POR: JOHNNY MIRANDA GOREZ
ESPECIALISTA: _____
REVISADO: _____
APROBADO: _____

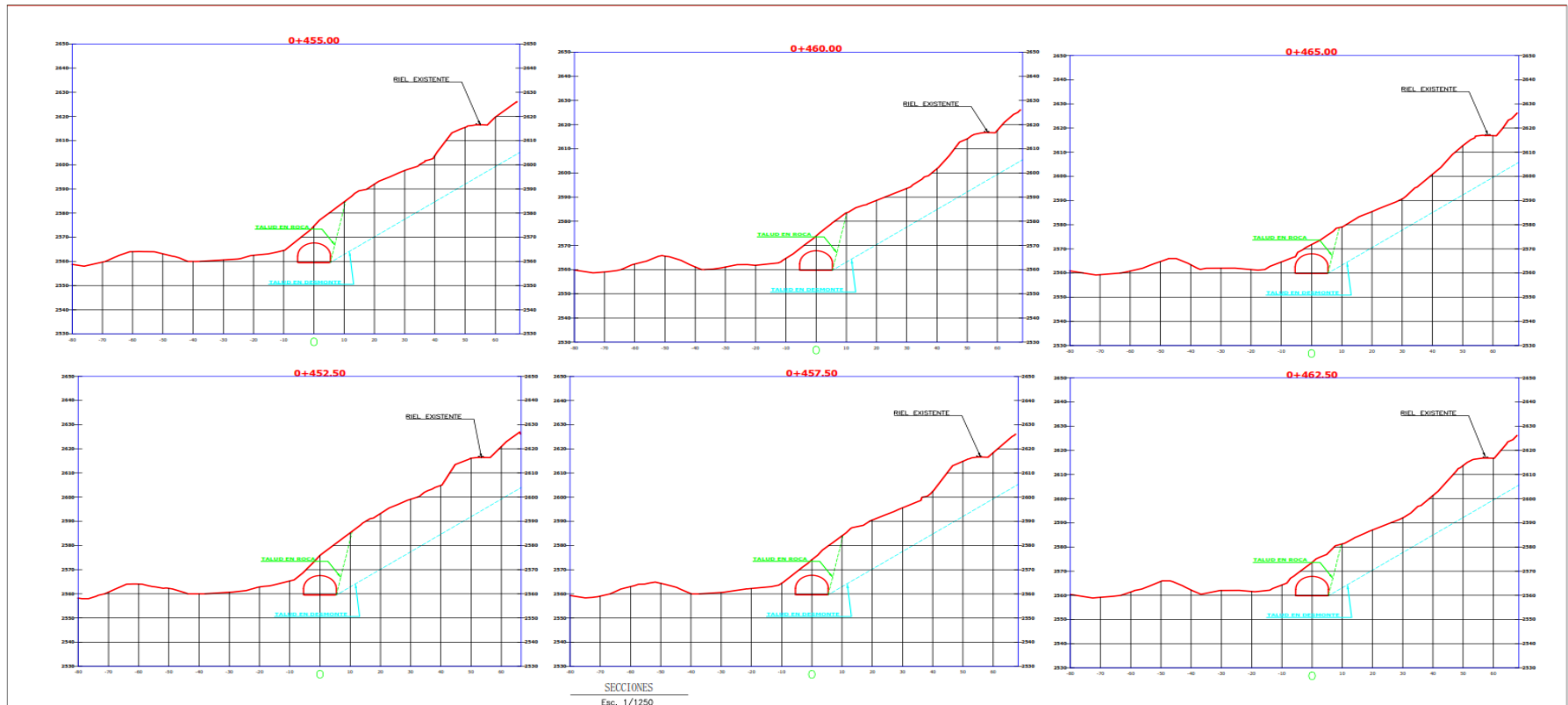
CONCESIONARIA:
 DEVIANDES

PROYECTO:
CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2
DE IIRCA CENTROS PTE. RICARDO PALMA - LA OROYA
HUANCAYO Y LA OROYA - DV. CERRO DE PASCO

TEMA:
ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO AFECTADO
POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA
DEL TUNEL CHACAHUARO II - LMA

PLANO:
SECCIONES TRANSVERSALES
PORTAL DE SALIDA TUNEL CHACAHUARO II

ESCALA: INDICADAS
FECHA: JULIO 2017
CODIGO: ST-01



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA



ELABORADO POR: JOHNNY MIRANDA GOMEZ
REVISADO:
APROBADO:

CONCESIONARIA:



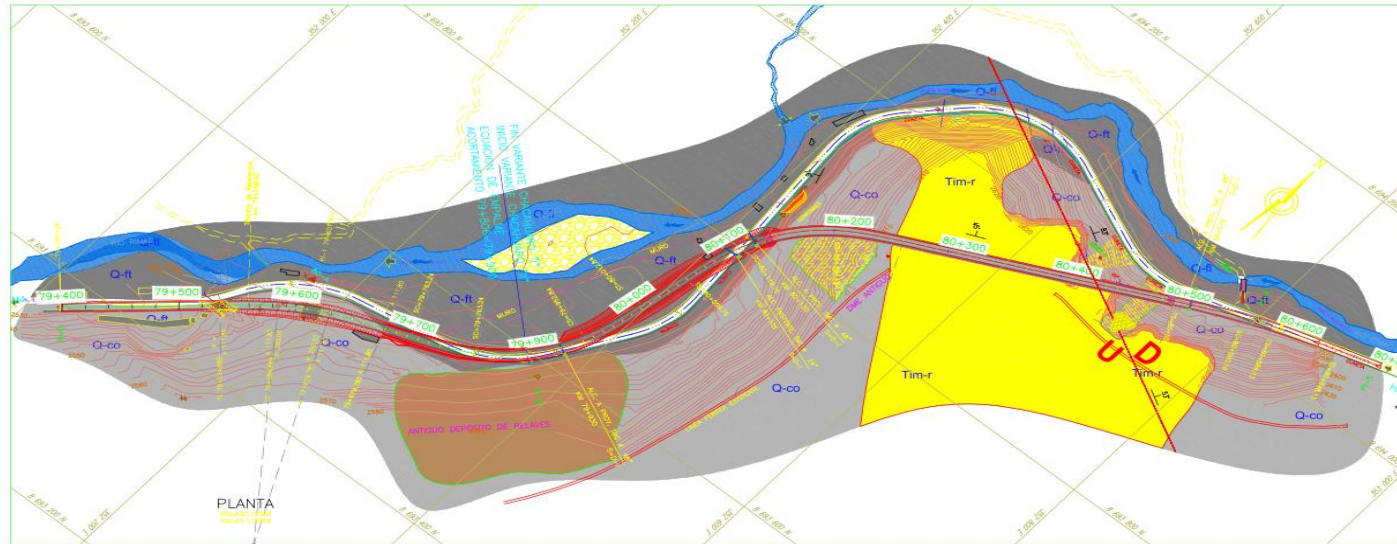
PROYECTO: CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2 DE BIRSA CENTRO- PTE - RICARDO PALMA - LA OROYA HUANCAYO Y LA OROYA - DV. CERRO DE PASCO

TEMAS: ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO AFECTADO POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA DEL TONEL CHACHAHUARO II - LIMA

PLANO: SECCIONES TRANSVERSALES PORTAL DE SALIDA TUNEL CHACHAHUARO II

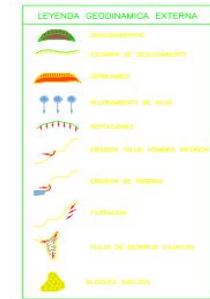
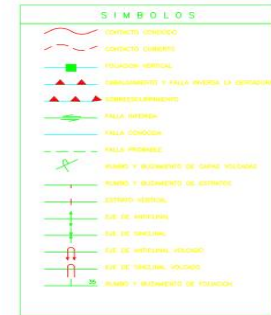
ESCALA: INDICADAS
FECHA: JULIO 2017
CODIGO: ST-02

MAPA GEOLOGICO LOCAL
VARIANTE CHACAHUARO II

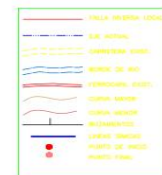
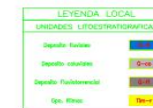


PLANTA

Esc. 1/2



LEYENDA



VISTA INGRESO DE LA VARIANTE CHACAHUARO II



BLOQUES SUELTAS DE LA FORMACION CARLOS FRANCISCO



VISTA PANORAMICA DE LA VARIANTE CHACAHUARO II



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA



ELABORADO POR : JORJENY MIRANDA GOMEZ
ESPECIALISTA :
REVISADO :
APROBADO :

CONCESIONARIA:
DEVIANTES



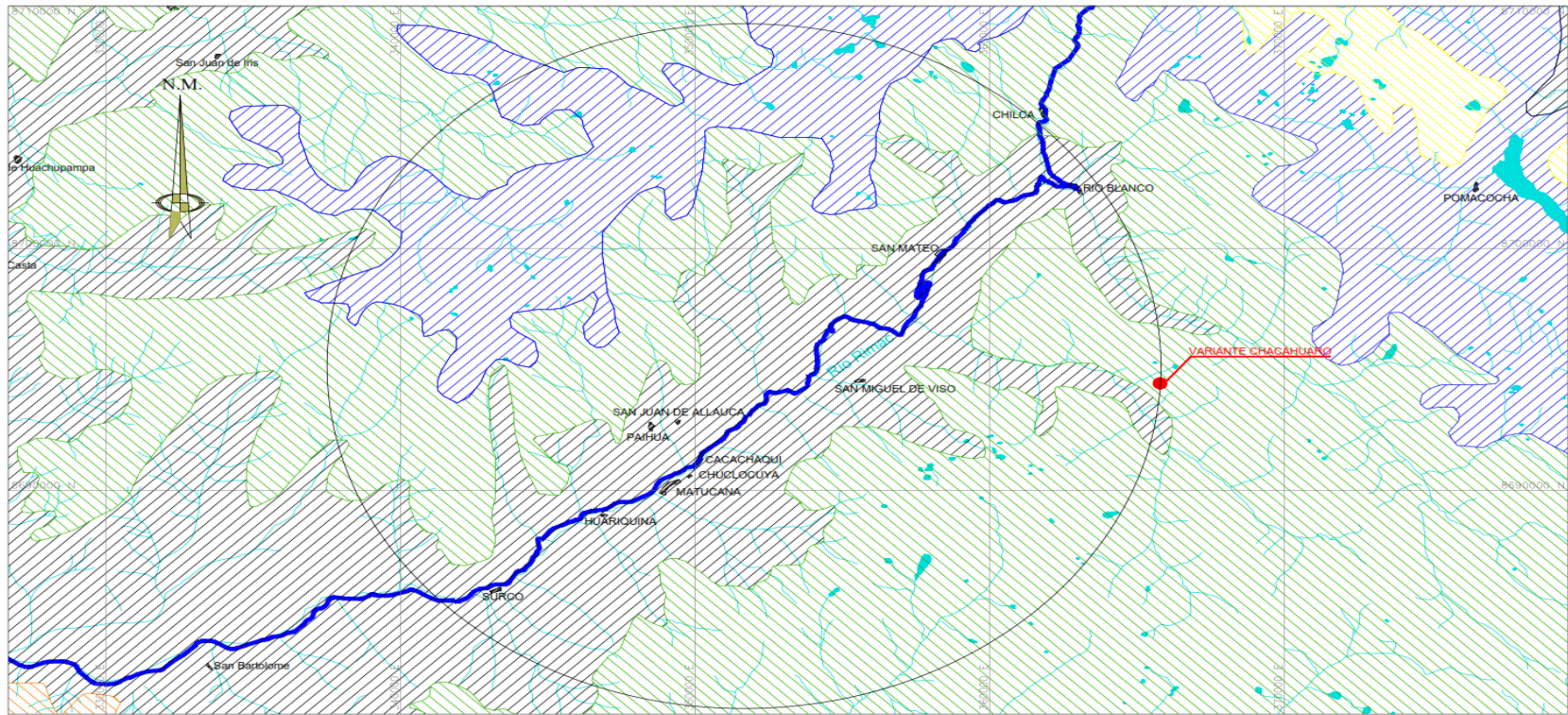
FUENTE:
CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2
DE HIRSA CENTRO PTE. RICARDO PALMA - LA OROYA
HUANCAYO Y LA OROYA - DV. CERRO DE PASCO

TESIS:
ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO AFECTADO
POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA
DEL TUNEL CHACAHUARO II - LIMA.

PLANO :

MAPA GEOLOGICO
LOCAL
KM 79+900 - 80+660

ESCALA : INDICADA
FECHA : OCTUBRE 2017
CODIGO : MGL-01



LEYENDA

ESTRIBACIONES DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL (BATOLETO)	
VALLÉS Y QUEBRADAS	
SUPERFICIE FUNA	
ALTIPLANICIE	
ALTAS CUMBRES	
RÍO	

ESCALA 1:150000



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNIA

ELABORADO POR : JOHNNY HERANDA G.
 ESPECIALISTA :
 DISEÑADO :
 APROBADO :

PROYECTISTA :

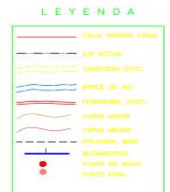
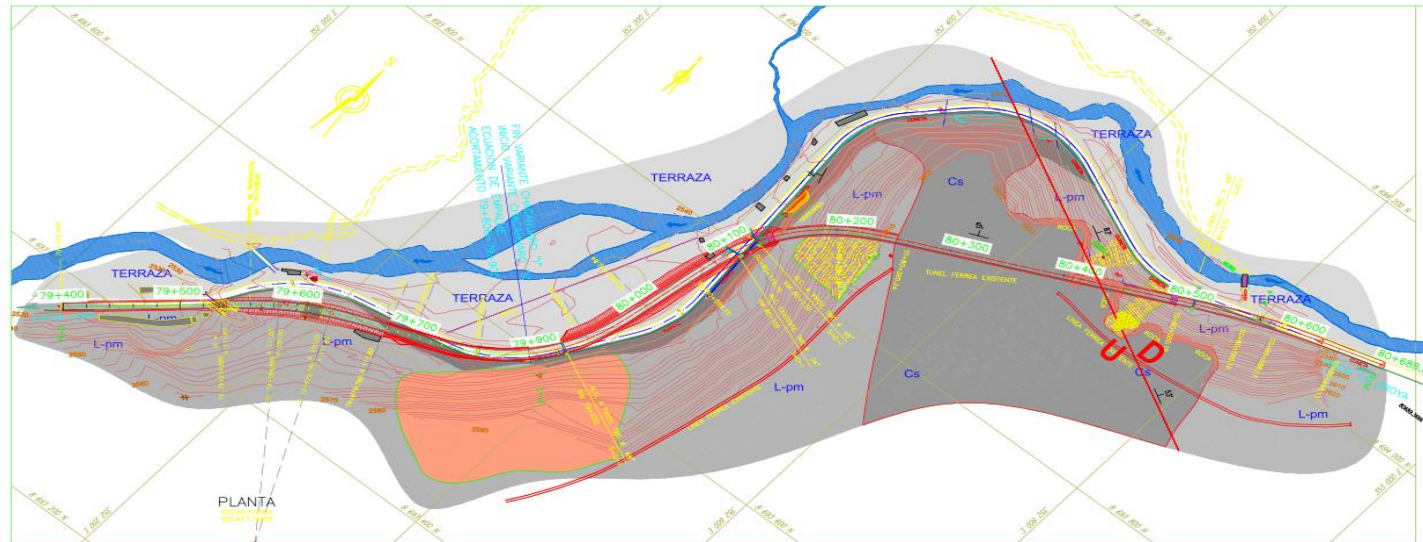
FUENTE : CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2 DE HIRSA CENTRO- PTE - RICARDO PALMA - LA OROYA HUANCAYO Y LA OROYA - DV. CERRO DE PASCO

TESIS: ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO RODONDO AFECTADO POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA DEL TUNEL CHACABUQUO II - LIMA

PLANO : MAPA GEOMORFOLOGICO REGIONAL VARIANTE CHACABUQUO I

ESCALA : 1:150000
 FECHA : MAYO 2017
 CROQUIS : MGR-02

MAPA GEOMORFOLOGICO LOCAL
VARIANTE CHACAHUARO II



VISTA INGRESO DE LA VARIANTE CHACAHUARO II

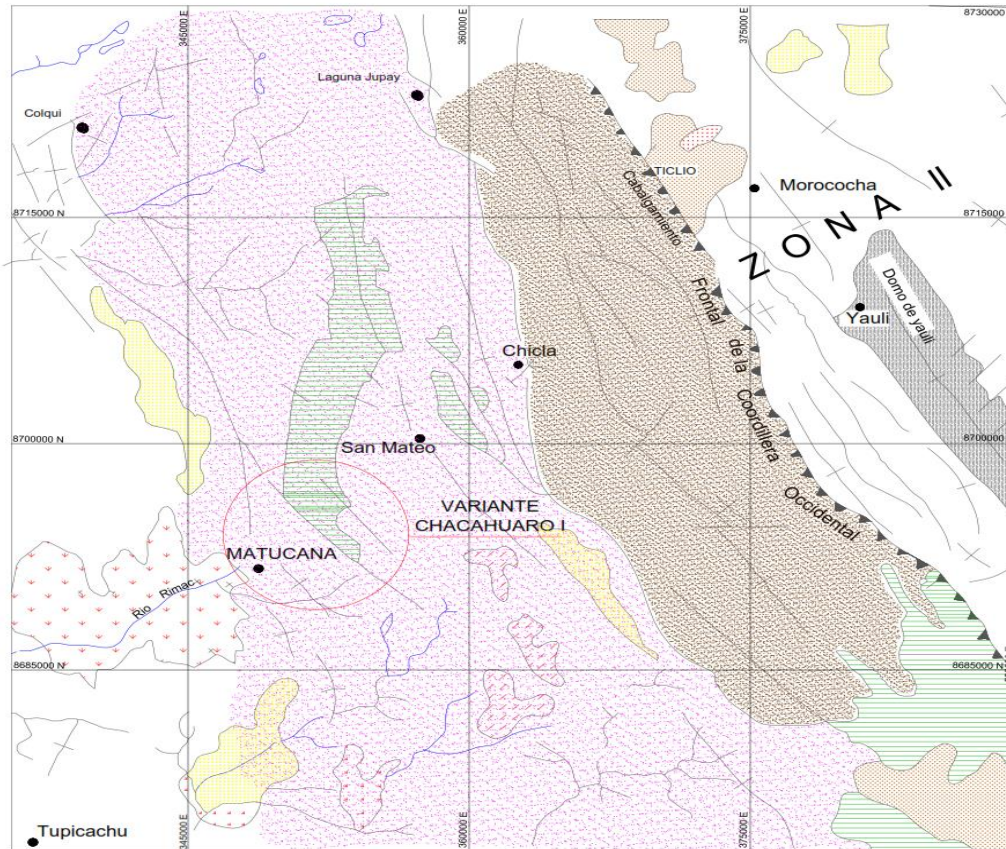




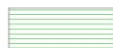


LADERAS CON PENDIENTES MODERADA



COLINAS Y LOMADAS MODELADAS EN ROCAS VOLCANICAS SEDIMENTARIAS

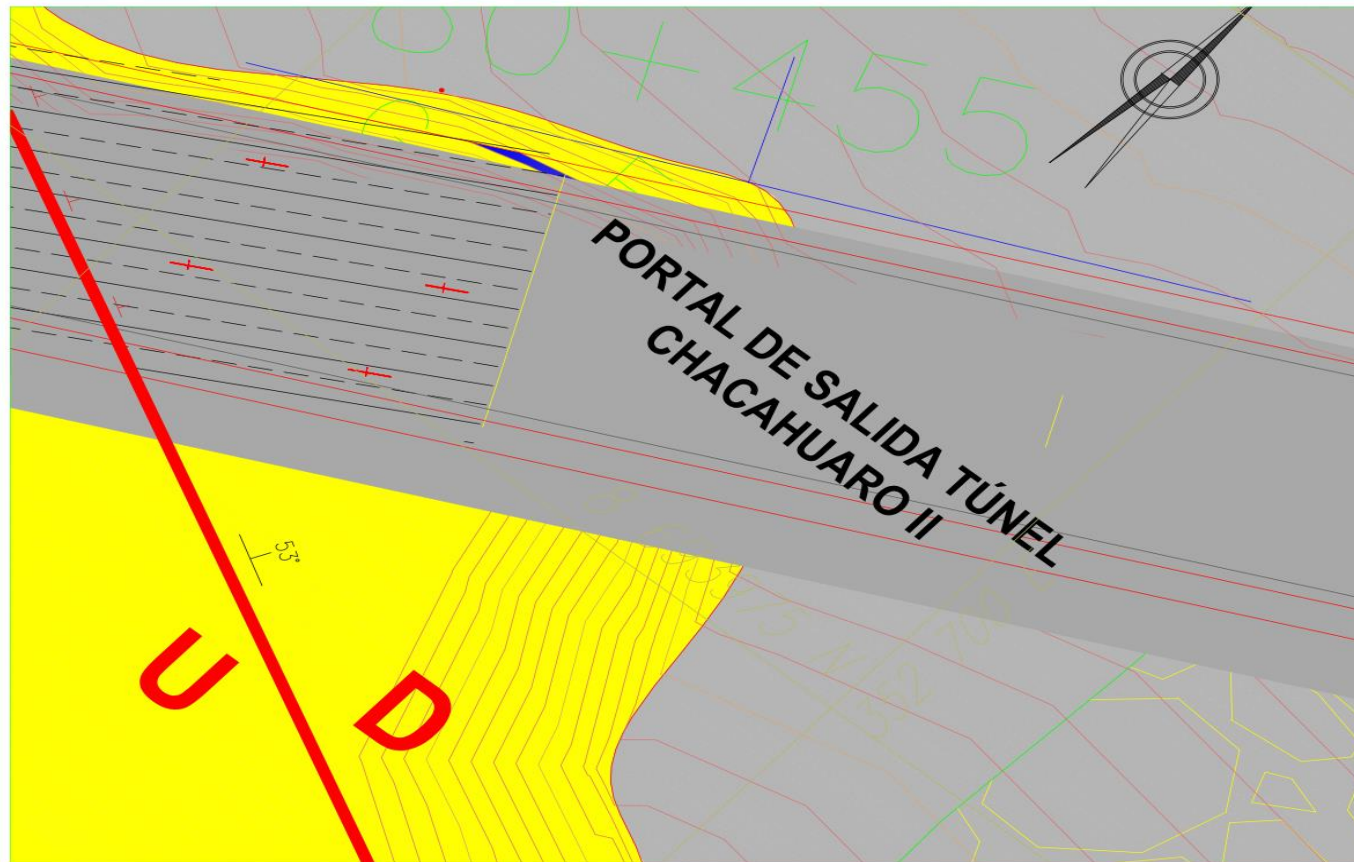
MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL REGIONAL (CHACAHUARO II)



-  Sector con Estructuras del Terciario Inferior -Superior
-  Sector con Estructuras del Cretác. Sup. -Terc. Inf.
-  Sector con Estructuras del Cretáceo inferior
-  Sector del Batolito
-  Intrusiones Hipabisales
-  Intrusiones Menores
-  Estructuras del Paleozoico
-  FALLAS , FRACTURAS
-  CABALGAMIENTOS

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOTECNIA</p>	ELABORADO POR: JORHAY HERANDE GOREX	CONSEJONARIAL:	FUENTE:	TESIS:	PLANO :	ESCALA :
	ESPECIALISTA :		CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2	ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO AFECTADO	MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL REGIONAL	1:125000
	REVISADO :		DE HIBA CENTRO PTE. - BICARDO PALMA - LA GROUYA	POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA	CHACAHUARO II	MAYO 2017
	APROBADO :		JHUANCAYO Y LA GROUYA - DV. CERRO DE PASCO	DEL TONEL CHACAHUARO II - LIMA		MGER-01

MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL LOCAL
VARIANTE CHACAHUARO II



LEYENDA LOCAL	
UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	
Deposito fluviales	Q-fl
Deposito coluviales	Q-co
Deposito Fluviotorrencial	Q-ft
Cpo. Rímac	Tim-r

LEYENDA	
	FAMILIA DE FRACTURAS
	53 RUMBO Y BUZAMIENTO DE FALLA
	FALLA LOCAL
	FRACTURA VERTICAL
	EJE ACTUAL
	CURVA MAYOR
	CURVA MENOR

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

ELABORADO POR: JOHNNY HIRABANDA GOMEZ
ESPECIALISTA:
REVISADO:
APROBADO:

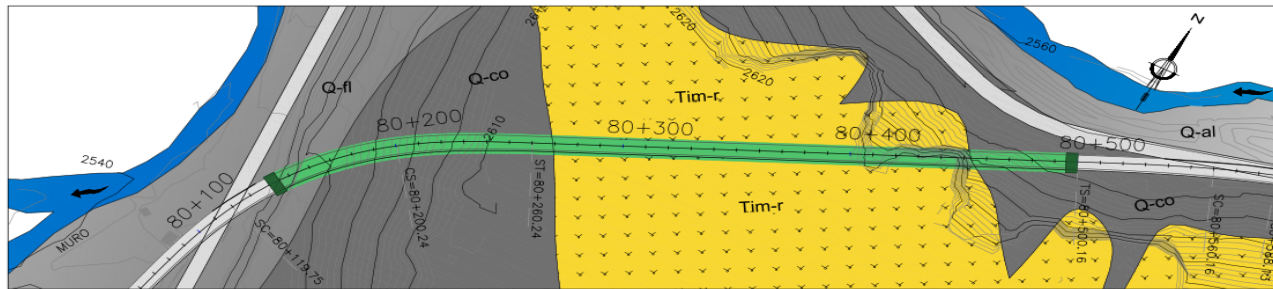
CONCESIONARIA:
DEVIANDES

FUENTE:
CONTRATO DE CONCESION DEL TRAMO 2 DE IRSACENTRO PTE. RICARDO PALMA - LA OROYA HUANCAYO Y LA OROYA - DV. CERRO DE PASCO

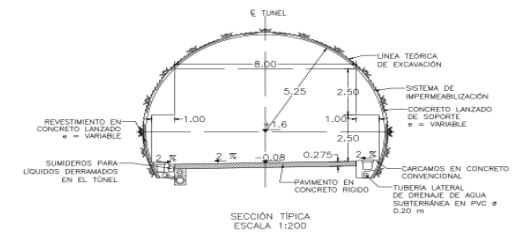
TESIS:
ANALISIS TENSO-DEFORMACIONAL DEL MACIZO ROCOSO AFECTADO POR FRACTURAS PARALELAS AL EJE DEL PORTAL DE SALIDA DEL TUNEL CHACAHUARO II - LIMA

PLANO:
MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL LOCAL
KM 80+440 - 80+460

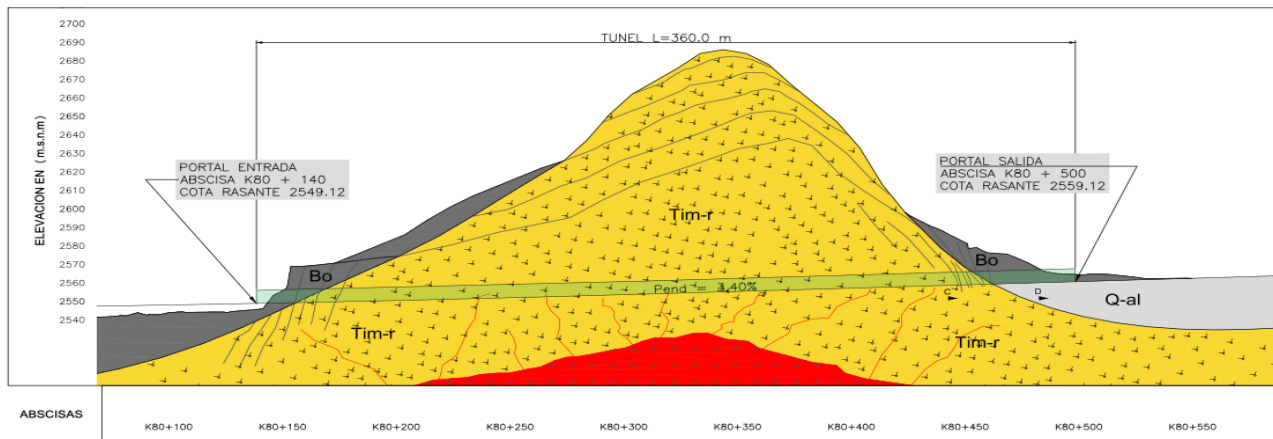
ESCALA:
GRAFICA
FECHA:
JULIO 2017
CODIGO:
MOEL-01



PLANTA
ESCALA 1:2000



SECCIÓN TÍPICA
ESCALA 1:200



CORTE GEOLÓGICO LONGITUDINAL
ESCALA 1:2000

CONVENCIONES			
ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRAFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Bolonería, fragmento de roca Bo Depósitos Fluviotorrencial Q-fl Depósitos aluviales Q-al
		TERCIARIO	MEDIO INFERIOR

NOTAS:

1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN DADAS EN METROS, EXCEPTO DONDE SE INDIQUE UNA UNIDAD DIFERENTE.
2. LAS COTAS DEL PROYECTO QUE SE INDICAN EN ESTE PLANO CORRESPONDEN A LA RASANTE TERMINADA.
3. NO SE MUESTRAN LOS DETALLES DE SOPORTE DEL TUNEL.