

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas



TESIS PROFESIONAL

**EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO
DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOGCHA FASE II -
MINERA YANACOGCHA SRL, 2018**

**PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS**

**PRESENTADO POR:
Bach. Edilberto Herrera Irigoín**

**ASESOR:
MCs. Roberto Severino Gonzales Yana**

**CAJAMARCA - PERÚ
2021**

AGRADECIMIENTO

A mi alma mater Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería – Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por haberme acogido y formarme como profesional.

Agradezco a Minera Yanacocha por permitirme realizar esta investigación, en particular al equipo del Proyecto Chaquicocha UG y al área de Geomecánica AESA.

Agradezco a mi familia y amigos, en especial a mis padres por su esfuerzo, comprensión y apoyo incondicional que me han brindado hasta el momento.

Edilberto H.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a Dios y a mis padres que me han dado la existencia; y en ella la capacidad por superarme y desear lo mejor en cada paso por este camino difícil y arduo de la vida.

A mí hijo Franco con todo amor y cariño.

Edilberto H.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 Clasificaciones Geomecánicas	4
2.2.3 Resistencia de la roca	5
2.2.4 Índice de Calidad de la Roca (RQD).....	6
2.2.5 Clasificación Geomecánica RMR	6
2.2.6 Clasificación Geomecánica GSI.....	10
2.2.7 Teoría de Sheorey (1994)	11
2.2.8 Criterio de rotura Hoek – Brown.....	13
2.2.9 Diseño de sostenimiento.....	15
2.2.10 Sostenimiento con pernos de anclaje.....	18
2.2.11 Sostenimiento con Shotcrete	18
2.2.12 Factor de seguridad	19
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	20
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.1.1 Ubicación Geográfica.....	22
3.1.2 Accesibilidad	23
3.1.3 Clima	23
3.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
3.2.1 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación	24
3.2.2 Población de estudio.....	24

	Pág.
3.2.3	Muestras 24
3.2.4	Unidad de análisis. 24
3.2.5	Definición de Variables..... 24
3.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 25
3.3.1	Técnicas..... 25
3.3.2	Instrumentos, Materiales y Equipos 25
3.4	PROCEDIMIENTOS 26
3.4.1	Etapa Preliminar 26
3.4.2	Etapa de Campo..... 27
3.4.3	Etapa de Gabinete..... 27
3.5	GEOLOGÍA 27
3.5.1	Alteración 28
3.5.2	Geología Estructural..... 29
3.5.3	Generalidades del Proyecto Chaquicocha UG 30
3.6	DISTRIBUCIÓN DE DISCONTINUIDADES 31
3.6.1	Tramo N° 01: PK 0 + 290 a 0 + 340 32
3.6.2	Tramo N° 02: PK 0 + 340 a 0 + 380 35
3.6.3	Tramo N° 03: PK 0 + 380 a 0 + 420 38
3.6.4	Tramo N° 04: PK 0 + 420 a 0 + 460 41
3.7	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO 44
3.7.1	Evaluación Geotécnica del Frente. 44
3.7.2	Resistencia de la roca 45
3.8	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TÚNEL..... 46
3.9	SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL 47
3.9.1	Aplicación del índice RMR para el diseño del sostenimiento..... 47
3.9.2	Definición del sostenimiento mediante el índice RMR MYSRL..... 47
3.10	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE EXCAVACIONES..... 49
3.10.1	Modelamiento geomecánico en Roca Regular Tipo III-B 50
3.10.2	Modelamiento geomecánico en Roca Regular Tipo III-A 52
3.10.3	Modelamiento geomecánico en Roca Buena Tipo II 54
3.11	CONTROL DE CALIDAD DEL SOSTENIMIENTO 56
3.11.1	Ensayos de Pull Test..... 56
3.11.2	Control de Calidad del Shotcrete..... 58

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 61

4.1	ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE DISCONTINUIDADES..... 61
4.2	DEFINICIÓN DEL SOSTENIMIENTO 61
4.3	ESTABILIDAD DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS 62
4.4	CONTROL DE CALIDAD..... 63
4.5	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS..... 63

	Pág.
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.1 CONCLUSIONES.....	64
5.2 RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 2.1	Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo 5
Tabla 2.2	Calidad del macizo rocoso según el índice RQD..... 6
Tabla 2.3	Parámetros de clasificación RMR..... 8
Tabla 2.4	Corrección por orientación de discontinuidades 9
Tabla 2.5	Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR ₈₉ 9
Tabla 2.6	Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR MYSRL. 10
Tabla 2.7	Sostenimiento a partir de índice RMR ₈₉ 16
Tabla 2.8	Recomendación de sostenimiento según el índice RMR MYSRL 17
Tabla 2.9	Características de pernos de anclaje..... 18
Tabla 2.10	Mezcla referencial de concreto lanzado resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ 19
Tabla 2.11	F.S. recomendado según plazo de estabilidad 20
Tabla 3.1	Operacionalización de variables 25
Tabla 3.2	Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 01 32
Tabla 3.3	Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 02 35
Tabla 3.4	Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 03 38
Tabla 3.5	Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 04 41
Tabla 3.6	Ensayos de resistencia a la carga puntual 45
Tabla 3.7	Caracterización geomecánica del túnel..... 46
Tabla 3.8	Diseño e instalación del sostenimiento en el túnel 48
Tabla 3.9	Resultados de ensayos de Pull Test en pernos Split Set de 8ft/40mm.... 57
Tabla 3.10	Resultados de ensayos de Pull Test en pernos helicoidales de 10ft/22mm..... 58

ÍNDICE DE FIGURAS

		pág.
Figura 2.1	Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades (Hudson, 1989).....	4
Figura 2.2	Medida de Orientación de Discontinuidades (González de Vallejo, 2002).	7
Figura 2.3	Estimación del Índice de Resistencia Geológica (Rockscience, 2013) ..	11
Figura 2.4	Relación entre la tensión horizontal media y la tensión vertical en función de la profundidad (Sheorey, 1994).	13
Figura 2.5	Guía para estimar el Factor de Alteración (D) (Rockscience, 2013).	14
Figura 3.1	Ubicación geográfica de Minera Yanacocha.	22
Figura 3.2	Alteraciones geológicas - Nv. 3750 (Yanacocha, 2017).....	29
Figura 3.3	Tramos de la Rampa 3740, para el análisis de estructuras	31
Figura 3.4	Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 01	33
Figura 3.5	Orientación de discontinuidad respecto al eje del túnel en el tramo N° 01	34
Figura 3.6	Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 02	36
Figura 3.7	Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 02	37
Figura 3.8	Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 03.	39
Figura 3.9	Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 03	40
Figura 3.10	Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 04	42
Figura 3.11	Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 04	43
Figura 3.12	Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-B.....	50
Figura 3.13	Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-B.....	51
Figura 3.14	Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-A	52
Figura 3.15	Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-A	53
Figura 3.16	Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad buena tipo II.....	54
Figura 3.17	Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad buena tipo II.....	55

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 3.1	Curva de resistencia (TN) Vs Elongación (mm), durante las pruebas de arranque a 02 pernos Split Set..... 57
Gráfica 3.2	Curva de resistencia (TN) Vs Elongación (mm), durante las pruebas de arranque a 02 pernos helicoidales. 58
Gráfica 3.3	Resistencias tempranas obtenidas en cada lanzamiento de shotcrete 59
Gráfica 3.4	Ensayos de resistencias tempranas, tomadas en campo promediadas a 1, 2 y 3 horas; se observa la línea de tendencia de acuerdo con tiempo de fraguado..... 59
Gráfica 3.5	Curva de resistencias a la compresión simple de paneles comprobando la edad necesaria para cumplir el 100% de la resistencia final (28 días) 60

LISTA DE ABREVIATURAS

MYSRL	:	Minera Yanacocha S.R.L.
AESA	:	Administración de Empresas S.A.
UG	:	Underground
Túnel	:	Túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II
Labor	:	Excavación Minera Subterránea
RMR	:	Rock Mass Rating
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica
RQD	:	Índice de calidad de roca
ISRM	:	Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
Is	:	Índice de Carga Puntual
UCS	:	Resistencia a la Compresión Simple
Osinergmin	:	Organismo supervisor de la inversión en energía y minería
DIP	:	Buzamiento
DIP DIRECTION	:	Dirección del Buzamiento
FS	:	Factor de seguridad
S.A.	:	Sociedad anónima
NV	:	Nivel de excavación
PK	:	Progresiva
SET	:	Sistema de discontinuidades
Jv	:	Cantidad de diaclasas por m ³
DS	:	Decreto Supremo
EM	:	Energía y Minas
N°	:	Número
TN	:	Tonelada
Mpa	:	Mega Pascal
Cx	:	Crucero
WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
GPS	:	Sistema de posicionamiento global
N	:	Norte
S	:	Sur
E	:	Este
W	:	Oeste
Pág.	:	Página
MEF	:	Método de elementos finitos
ft	:	Pies
pulg.	:	Pulgadas
cm.	:	Centímetro
h	:	Horas
m	:	Metro
mm	:	Milímetros
vs.	:	Versus
%	:	Porcentaje
msnm.	:	Metros sobre el nivel del mar

RESUMEN

La investigación se realiza en el Túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II, perteneciente a la compañía Minera Yanacocha S.R.L. (MYSRL), ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca. Comprende una longitud de 195m lineales con sección de 5.0m x 5.5m y gradiente de hasta +13%. El portal de ingreso hacia las labores subterráneas se ubica al nor-oeste del tajo Chaquicocha sobre una plataforma ubicada a 3750msnm. En el Perú las estadísticas de accidentes con consecuencias mortales en minería muestran que más del 20% son por caída de rocas en minería subterránea, por lo que es prioridad en este proyecto garantizar la estabilidad de las excavaciones. Las evaluaciones geomecánicas realizadas a lo largo del túnel, usando las clasificaciones geomecánicas de RMR y GSI adaptadas por MYSRL, determinan que el macizo rocoso es de calidad buena tipo II, regular tipo III-A y regular tipo III-B; para los que se ha determinado sostenimiento con shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de longitud espaciado a 1.7m, 1.5m y 1.2m respectivamente. Los análisis realizados mediante software Phase2 v 8.0, muestran un comportamiento estable del túnel con el sostenimiento recomendado, siendo el factor de seguridad mayor a 1.50. Los ensayos de control de calidad en pernos Split Set arrojan una resistencia a tracción mayor a 8 TN y el shotcrete adquiere una resistencia final mayor a los 35 MPa. Estos resultados aseguran el rendimiento del sostenimiento instalado en el túnel y garantizan la operatividad durante su vida útil promedio de 10 años.

PALABRAS CLAVES: Evaluación geomecánica, macizo rocoso, túnel, sostenimiento, estabilidad.

ABSTRACT

The investigation is carried out in the Chaquicocha Exploration Tunnel - Phase II, belonging to the company Minera Yanacocha S.R.L. (MYSRL), located in the province and department of Cajamarca. It comprises a length of 195 linear meters with a section of 5.0m x 5.5m and a gradient of up to + 13%. The entrance portal to the underground workings is located to the north-west of the Chaquicocha pit on a platform located at 3750 meters above sea level. In Peru, the statistics of accidents with fatal consequences in mining show that more than 20% are due to falling rocks in underground mining, so it is a priority in this project to guarantee the stability of the excavations. The geomechanical evaluations carried out along the tunnel, using the RMR and GSI geomechanical classifications adapted by MYSRL, determine that the rock mass is of good quality type II, regular type III-A and regular type III – B; for which 2 in. shotcrete support has been determined. reinforced with synthetic fiber and 8ft long Split Set bolt spaced at 1.7m, 1.5m and 1.2m respectively. The analyzes carried out using Phase2 v 8.0 software show a stable behavior of the tunnel with the recommended support, the safety factor being greater than 1.50. Quality control tests on Split Set bolts show a tensile strength greater than 8 TN and the shotcrete acquires a final strength greater than 35 MPa. These results ensure the performance of the support installed in the tunnel and guarantee operability during its average useful life of 10 years.

KEY WORDS: Geomechanical evaluation, rocky massif, tunnel, support, stability.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En los últimos 10 años, los accidentes por caída de roca han encabezado la lista de accidentes con consecuencias mortales en minería subterránea. Sobre la base de este hecho, los organismos de supervisión y las empresas mineras vienen prestando especial atención en difundir criterios geomecánicos que según las mejores prácticas de la ingeniería se emplean actualmente para el diseño, construcción, operación y cierre de labores mineras, a fin de disminuir drásticamente ésta fatal estadística.

Minera Yanacocha viene desarrollando actualmente el proyecto de exploración denominado Chaquicocha Underground, que se encuentra en el tajo del mismo nombre donde las actividades de Open Pit se encuentran paralizadas. Administración de Empresas S.A. como parte del programa de exploraciones, viene ejecutando la ampliación del proyecto: Construcción del túnel de exploración Chaquicocha - Fase II, construyéndose actualmente la Rampa 3740, se ejecutan las siguientes actividades que cumplen un ciclo de minado: perforación, voladura, ventilación, riego con agua a presión, desatado de rocas, eliminación de material suelto producto de la voladura y del desatado de rocas, carguío y acarreo, sostenimiento (pernos de anclaje, colocación de malla y lanzado de Shotcrete (vía húmeda) siendo todas estas actividades ejecutadas en forma mecanizada, eliminado todo tipo de trabajo manual. Siendo necesario garantizar la estabilidad de las labores.

Frente a esta situación se plantea la pregunta ¿Cuál es el comportamiento geomecánico del macizo rocoso que permitirá diseñar el sostenimiento del túnel de exploración Chaquicocha - Fase II? Al respecto se plantea la siguiente hipótesis: La caracterización geomecánica del macizo rocoso permite definir el diseño del sostenimiento adecuado del túnel de exploración Chaquicocha – Fase II y la instalación del sostenimiento asegura la estabilidad de las excavaciones; debiéndose aplicar ensayos de control de calidad, los mismos que permitirán asegurar el rendimiento de los elementos de sostenimiento instalados en el macizo rocoso.

La mayor cantidad de accidentes en minería subterránea en nuestro país es provocada por la caída de rocas, debido a la pérdida de equilibrio del macizo rocoso producto de las excavaciones subterráneas. Ante esta problemática se tiene que realizar una evaluación geomecánica del macizo rocoso con el fin de estimar el sostenimiento adecuado que garantice la estabilidad de las labores subterráneas proporcionando condiciones seguras de trabajo durante y posterior a la construcción del túnel. De esta manera; el estudio constituirá un aporte importante que servirá como base en la construcción de futuras labores subterráneas del proyecto Chaquicocha UG – MYSRL.

El objetivo general de la investigación es realizar la evaluación geomecánica para definir el diseño del sostenimiento del túnel de exploración Chaquicocha - Fase II, MYSRL. Los objetivos específicos son determinar la calidad del macizo rocoso usando las clasificaciones geomecánicas de RMR y GSI, analizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas mediante software Phase2, realizar ensayos de control de calidad al sostenimiento instalado en labores subterráneas.

La investigación se organizó en cinco capítulos; en el capítulo I, se presenta el contexto de investigación, planteamiento y formulación del problema, hipótesis, importancia de la investigación, delimitación y los objetivos de la investigación. En el capítulo II; se presenta el marco teórico de la investigación, con los antecedentes teóricos de la investigación, bases teóricas en las cuales se ha fundamentado la investigación y definición de términos básicos. El capítulo III, hace referencia a los materiales y métodos, ubicación geográfica donde se realiza la investigación, el procedimiento a seguir, tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados. En el capítulo IV; se realiza el análisis y discusión de resultados, exponiéndose los resultados y contrastándose con la hipótesis. Finalmente en el capítulo V; se presentan algunas conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado en el estudio de investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

Rayo (2007). Realiza un estudio de Sectorización Geotécnica del Túnel de Drenaje Etapa 2, Expansión Norte de Mina sur, División Codelco Norte, Santiago de Chile, Chile. Concluye que el sostenimiento para roca tipo III consistió en la colocación de pernos helicoidales galvanizados de 2,50 m de longitud anclados con resina de poliéster y malla biscocho galvanizada 10006. El sostenimiento para roca tipo IV consistió en la aplicación de pernos helicoidales galvanizados de 2,50m de longitud y anclados con resina de poliéster, hormigón proyectado con fibra de polipropileno y malla biscocho galvanizada 10006.

Aguilar (2008). Realiza el estudio de caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, Mina Chuquicamata, Santiago de Chile, Chile. Concluye que el sostenimiento instalado en los desarrollos subterráneos considera un 96,4% en pernos sistemáticos y malla tejida, un 3,1% requirió además de la proyección de Shotcrete y el 0,5% de la instalación de marcos metálicos. Se instalaron marcos metálicos en la zona de la Falla Oeste en roca de Mala y Muy Mala calidad geotécnica y en la zona del portal al Banco M-3 del rajo. La proyección de Shotcrete fue requerida en roca de calidad geotécnica Mala y en menor proporción en roca de Regular calidad.

Quispe (2012). En su estudio comportamiento de roca blanda en un túnel de exploración diseñado con el sistema Q, Lima, Perú. Concluye la importancia del conocimiento de la geotecnia y el rendimiento de observación de la calidad de la roca insitu en cada etapa de excavación del túnel puede advertir las diferencias del tipo de sostenimiento asignado en el diseño proyectado y el tipo de sostenimiento requerido en el momento.

Soto (2016). Diseño de sostenimiento en el túnel Wayrasencca – Ollachea, Puno, Perú. Concluye que las características estructurales y geológicas analizadas mediante las clasificaciones geomecánicas de RMR Y Q, determinaron el tipo de sostenimiento a utilizar en los tramos de Roca según las recomendaciones de Bieniawski y Barton.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Clasificaciones Geomecánicas

Tomando en consideración lo expresado por González de Vallejo (2002), la finalidad de las clasificaciones geomecánicas es la obtención de parámetros geomecánicos para su empleo en el diseño y proyecto de obras de ingeniería. Estas clasificaciones aportan mediante la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización de ensayos, índices de calidad relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y sus características frente a los sostenimientos de túneles y taludes.

Las características de los macizos rocosos que vamos a considerar en las diferentes clasificaciones geomecánicas que utilizaremos son las siguientes:

- Resistencia del macizo rocoso.
- RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Estructura geológica y fallas.
- Filtraciones y presencia de agua.
- Estado tensional.

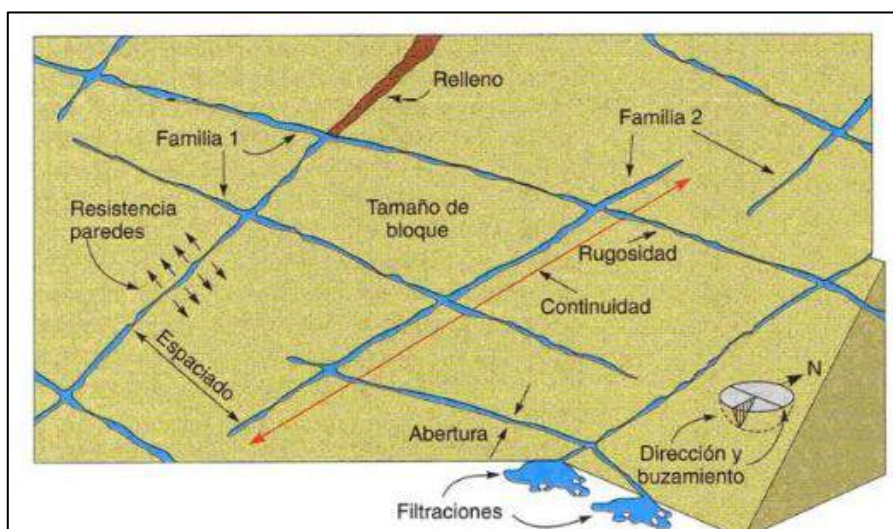


Figura 2.1 Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades.

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

La cuantificación de los parámetros y características, proporcionan datos necesarios para la aplicación de las clasificaciones geomecánicas en la determinación de la calidad del macizo rocoso.

2.2.3 Resistencia de la roca

Tomando lo descrito por Gavilanes y Andrade (2004), la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta es probablemente la propiedad mecánica más empleada con fines geotécnicos y que a más de ser obtenida en ensayos de laboratorio, puede ser estimada a partir de la Tabla 2.1, usando únicamente los grados R0 a R6.

Tabla 2.1 Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo

CLASE	RESISTENCIA	RESISTENCIA UNIAxIAL Mpa	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Mpa	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL CAMPO	EJEMPLOS
R6	Extremadamente Resistente	>250	>10	Solo se pueden romper esquirlas de la roca con el martillo de geólogo.	Basalto, diabasa, granito, curacita, chert.
R5	Muy Resistente	100 - 250	4 - 10	Se necesita de muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	Anfibolita, arenisca, gneiss, grabo, granodiorita, basalto.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.	Caliza, mármol, esquisto, arenisca.
R3	Moderadamente Resistente	25 - 50	1 - 2	No se puede rayar o desconchar con una navaja, las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	Concreto, esquisto, carbón, siltsone.
R2	Débil	5.0 - 25		Puede desconcharse con dificultad con una navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo.	Creta, marga, yeso, esquisto, shale.
R1	Muy Débil	1.0 - 5.0		Deleznable bajo golpes fuertes con la punta del martillo de geólogo, puede desconcharse con una navaja.	Roca alterada, shale.
R0	Extremadamente Débil	0.25 - 1		Rayado por la uña del dedo pulgar.	Falla delgada rígida.

Fuente: Caracterización, prueba y monitoreo de rocas (Brown, 1981).

2.2.4 Índice de Calidad de la Roca (RQD)

El índice RQD, rock quality designation, considera el grado de fracturamiento y clasifica al macizo rocoso en diferentes grados de calidad.

Para el RQD su expresión de cálculo según Palmstron es:

$$RQD = 115 - 3.3 * J_v \dots\dots\dots \text{Ecuación (1)}$$

$$\text{Para } J_v < 4,5 \quad RQD = 100$$

Donde J_v está definido como cantidad de diaclasas por m³.

Tabla 2.2 Calidad del macizo rocoso según el índice RQD

RQD (%)	Calidad
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 - 100	Muy buena

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Las clasificaciones geomecánicas que utilizaremos en esta investigación son los sistemas RMR y GSI, que se utiliza exclusivamente en túneles. Estas clasificaciones geomecánicas nos permiten determinar el tipo de sostenimiento a emplear en la excavación subterránea.

2.2.5 Clasificación Geomecánica RMR

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo, excavación y sostenimiento en túneles. Esta clasificación evalúa los siguientes parámetros geomecánicos:

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
2. Grado de fracturación en términos del RQD.
3. Espaciado de las discontinuidades.
4. Condiciones de las discontinuidades, que incluye:
 - Longitud de las discontinuidades.

- Abertura.
 - Rugosidad.
 - Relleno.
 - Alteración.
5. Condiciones hidrogeológicas.
 6. Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso se expresa del índice de calidad RMR, rock mass rating, que varía de 0 a 100. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Considerando lo descrito por Sánchez (2003), los cinco primeros parámetros constituyen el RMR básico, en este sistema el índice RMR se consigue sumando la valoración asignada a cada uno de ellos. Estos cinco números, van en función de la resistencia a compresión simple de la roca matriz, el RQD, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición de las discontinuidades, la condición del agua. La Tabla 2.3 es una síntesis del sistema RMR básico.

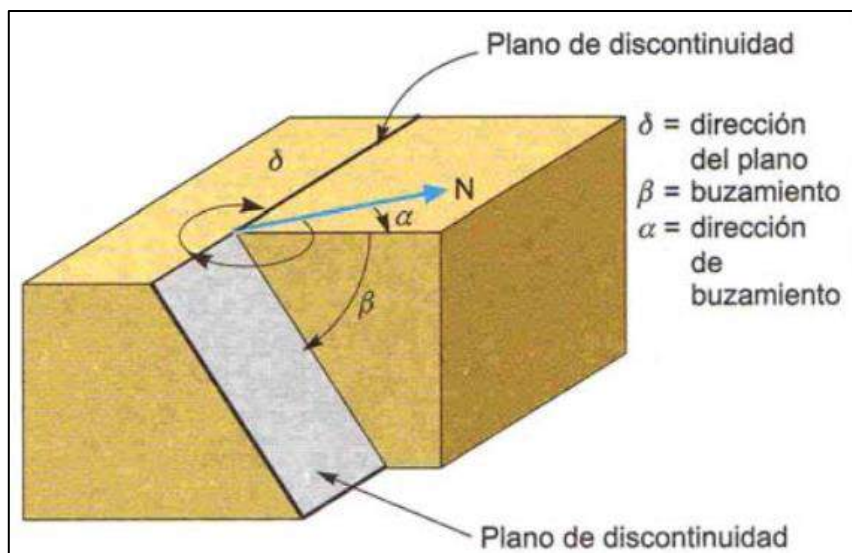


Figura 2.2 Medida de Orientación de Discontinuidades.
 Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2.3 Parámetros de clasificación RMR

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

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Una vez obtenido el RMR básico, Bienawski (1989), propone ajustar este número en función del sexto parámetro, orientaciones de las discontinuidades con respecto a la orientación de la excavación proyectada, definido cualitativamente. Los factores de ajuste para el caso de túneles se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Corrección por orientación de discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
Orientación de las discontinuidades en el túnel						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0 - 20 Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	Buz. 45 - 90	Buz. 20 - 45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Finalmente, el índice RMR se obtiene realizando la sumatoria de los seis parámetros. Dependiendo del estado de las características indicadas, conseguirán una puntuación determinada y mediante la suma de dichas puntuaciones se conseguirán unos valores, que se situaran entre 0 y 100 (Sánchez, 2003).

Tabla 2.5 Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR₈₉

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	81 – 100	> 4 Kg/cm ²	> 45°
II	Buena	61 – 80	3 - 4 Kg/cm ²	35° - 45°
III	Media	41 – 60	2 - 3 Kg/cm ²	25° - 35°
IV	Mala	21 – 40	1 - 2 Kg/cm ²	15° - 25°
V	Muy mala	< 20	< 1 Kg/cm ²	< 15°

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

El sistema RMR, desde sus inicios ha tenido varias modificaciones planteadas por Bienawski y otros autores. Esto principalmente debido a que la determinación de la calidad del macizo rocoso implica la selección del tipo de sostenimiento por lo que se debe dar mayor importancia al valor del RMR y en menor medida a la clase de macizo rocoso, dentro del cual este valor cae. Así, para el proyecto Chaquicocha UG, lugar donde se realiza esta investigación, se ha hecho una pequeña extensión al sistema pero manteniendo esencialmente su principio (Tabla 2.6), en adelante llamaremos índice RMR MYSRL.

Tabla 2.6 Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR MYSRL.

RMR	Calidad	Tipo
61 – 80	Buena	II
51 – 60	Regula	III-A
41 – 50	Regula	III-B
31 – 40	Mala	IV-A
21 – 30	Mala	IV-B
0 – 20	Muy Mala	V

Fuente: Área de geomecánica del Proyecto Chaquicocha UG (MYSRL, 2017).

2.2.6 Clasificación Geomecánica GSI

El Índice de Resistencia Geológica (GSI) desarrollado por Hoek y Brown en 1997, es un método de clasificación geomecánica que se basa en la identificación y clasificación de dos características fundamentales para su cálculo, las cuales son la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades (Gavilanes y Andrade, 2004).

Según este índice, considerando lo descrito por Hoek (1994), la fuerza de un macizo, depende de las propiedades de los bloques de roca intacta y también sobre la capacidad de ellas de resistirse al deslizamiento y rotación entre sí.

La valoración del GSI también puede determinarse por medio de los valores del RMR.

Para $RMR_{89} > 23$, el índice de resistencia geológica es:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \dots \dots \dots \text{Ecuación (2)}$$







Rock Type: GSI Selection:	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60	50	40
 VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	60	50	40	30
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	50	40	30	20
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40	30	20	10
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A	10	10	10

Figura 2.3 Estimación del Índice de Resistencia Geológica

Fuente: Índice de Resistencia Geológica (Rockscience, 2013)

2.2.7 Teoría de Sheorey (1994)

Es un modelo de esfuerzos termo-elastoestático que busca estimar las tensiones en la corteza terrestre, considerando la variación de la elasticidad, la densidad y el coeficiente de expansión térmica en la corteza y manto terrestre. Busca obtener el esfuerzo horizontal en formaciones blandas, fracturadas y generalmente débiles. Manifiestando que las principales causas de los estados de esfuerzos en la corteza terrestre son: (I) la gravedad, (II) la restricción de desplazamientos laterales o presión de confinamiento (se expresa en

función de la relación de Poisson), (III) la tectónica de placas, (IV) las estructuras geológicas, (V) las propiedades de la roca y (VI) la topografía del terreno (Sheorey, 1994).

Considerando la ecuación de Sheorey, la estimación del esfuerzo vertical y horizontal será de la siguiente manera:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot z = \gamma \cdot z \dots \dots \dots \text{Ecuación (3)}$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \dots \dots \dots \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

- σ_v : Esfuerzo vertical en GPa.
- γ : Peso específico de la roca Tn/m³.
- Z : profundidad de la excavación en m.
- K : Coeficiente de reparto de tensiones

Para materiales más o menos competentes situados a profundidades medias de hasta 600 ó 700 metros de profundidad, se puede utilizar la fórmula de Sheorey siguiente:

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

Donde:

- E_h : Módulo de deformación en dirección horizontal en GPa.
- Z : Profundidad de la excavación en m.
- K : Coeficiente de reparto de tensiones

El módulo de elasticidad del macizo puede obtenerse en función de la calidad geotécnica del macizo rocoso según el índice RMR.

Para valores de RMR > 55. Bieniawski (1978), propone la siguiente expresión:

$$E_h = 2RMR - 100 \text{ (GPa)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (6)}$$

Para valores de 10 <RMR < 50. Serafim y Pereira (1983), proponen la siguiente expresión:

$$E_h = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \text{ (GPa)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (7)}$$

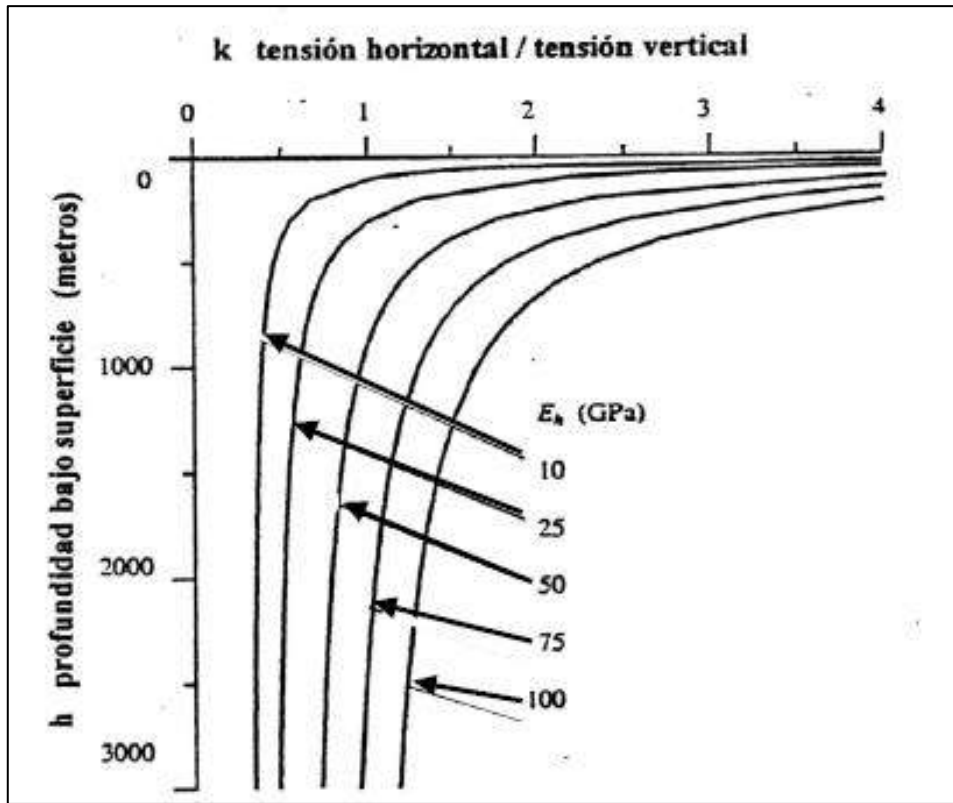


Figura 2.4 Relación entre la tensión horizontal media y la tensión vertical en función de la profundidad.

Fuente: Teoría de tensiones in situ en rocas isotrópicas y transversalmente isotrópicas (Sheorey, 1994).

2.2.8 Criterio de rotura HOEK – BROWN

Fue desarrollado por Hoek y Brown en 1980 y su última actualización fue en el 2002, el punto de partida conceptual para este criterio fue la teoría de Griffith. El criterio generalizado de Hoek-Brown (2002) sirve para evaluar la resistencia de los macizos rocosos y matriz rocosa, mediante los valores adecuados para el ángulo de fricción interno (ϕ) y la cohesión (c). Hoek y Brown sustituyeron el índice RMR por el GSI, por considerar que la aplicación del RMR no se adecuaba al análisis de macizos rocosos de mala calidad.

El criterio de rotura se establece como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots\dots\dots \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

m_b : valor reducido de la constante m_i .

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \dots\dots\dots \text{Ecuación (9)}$$

s, a : son constantes del macizo rocoso.

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \dots\dots\dots \text{Ecuación (10)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación (12)}$$

D : depende del grado de perturbación al cuál ha estado sometido el macizo rocoso, causado por la voladura y las tensiones de relajación. Este factor varía de 0 a 1 donde la valoración 0 pertenece a macizos rocosos no perturbados y 1 para macizos rocosos altamente perturbados.




	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D=0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.	D=0
	Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D=0.5 No Invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D=0.8

Figura 2.5 Guía para estimar el Factor de Alteración (D)

Fuente: Criterio de Rotura de Hoek-Brown (Rockscience, 2013).

Para estimar la resistencia de un macizo rocoso diaclasado y sus características de deformación se requiere de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- Constante m_i para la roca intacta.
- GSI del macizo rocoso.

2.2.9 Diseño de sostenimiento

Según Osinergmin (2017), “el sostenimiento en excavaciones subterráneas tiene la finalidad de asegurar, controlar y mantener la estabilidad de éstas, a fin de proporcionar condiciones seguras de trabajo y brindar acceso a las labores subterráneas”. Atendiendo como actúa en la roca, el sostenimiento podrá ser activo o pasivo y/o mixto.

- **Sostenimientos pasivos:** Los elementos de sostenimiento pasan a formar parte integral de la roca.
- **Sostenimientos activos:** los elementos de sostenimiento son externos a la roca
- **Sostenimiento mixto:** es la combinación de elementos de sostenimiento activos y pasivos. Este tipo generalmente se usa para el diseño de sostenimiento.

Los elementos de sostenimiento pueden ser cuadros de madera, cimbras metálicas, puntales, gatas hidráulicas, pernos de anclaje, pernos con resisna, barra helicoidal, swellex, Split set, cables, malla (electro-soldada y eslabonada) y shotcrete. Para determinar el tipo de sostenimiento a más adecuado se debe tener en cuenta la caracterización geomecánica del macizo rocoso, los requerimientos de servicio de la excavación, el equipo de construcción y los costos de instalación.

El diseño de sostenimiento obedece en gran medida a las recomendaciones establecidas por las diferentes clasificaciones geomecánicas en función a la calidad del macizo rocoso. Las recomendaciones de sostenimiento del sistema RMR_{89} se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Sostenimiento a partir de índice RMR₈₉

Clase RMR	Excavación	Sostenimiento		
		Bulones	Gunita	Cerchas
I 100-81	Sección completa Avances 3 m.	Innecesario, salvo algún bulón ocasional.	No.	No.
II 80-61	Sección completa Avances de 1-1.5 m.	Bulonado local en clave, con longitudes de 2-3 m y separación de 2-2.5 m, eventualmente con mallazo.	5 cm en clave para impermeabilización.	No.
III 60-41	Avance y destroza. Avances de 1.5 a 3 m. Completar sostenimiento a 20 m del frente.	Bulonado sistemático de 3-4 m con separaciones de 1.5 a 2 m en clave y hastiales. Mallazo en clave.	5 a 10 cm en clave y 3 cm en hastiales.	No.
IV 40-21	Avance y destroza. Avances de 1 a 1.5 m. Sostenimiento inmediato del frente. Completar sostenimiento a menos de 10 m del frente.	Bulonado sistemático de 4-5 m con separaciones de 1-1.5 m en clave y hastiales con mallazo.	10 a 15 cm en clave y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación.	Cerchas ligeras espaciadas 1.5 m cuando se requieran.
V ≤ 21	Fases múltiples. Avances de 0.5 a 1 m. Gunitar inmediatamente el frente después de cada avance.	Bulonado sistemático de 5-6 m, con separación de 1-1.5 m en clave y hastiales con mallazo. Bulonado en solera.	15-20 cm en clave, 15 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada avance.	Cerchas pesadas separadas 0.75 m con blindaje de chapas y cerradas en solera.

Túneles de sección en herradura, máxima anchura 10 m, máxima tensión vertical 250 kp/cm².

Fuente: Ingeniería Geológica (González de Vallejo, 2002).

Al igual que en el sistema RMR₈₉, considerando las características técnicas del túnel, las recomendaciones de sostenimiento de este sistema han sido adaptadas y modificadas de acuerdo a las necesidades reales del proyecto. Las recomendaciones se muestran en la Tabla 2.8. En adelante llamaremos recomendaciones de sostenimiento según el índice RMR MYSRL.

Tabla 2.8 Recomendación de sostenimiento según el índice RMR MYSRL

Recomendación de sostenimiento por tipo de roca y tipo de labor			
RMR	Calidad	Tipo	Labores de avance
61 - 80	Buena	II	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno sistemático de 8 pies de largo de 1.7 m a 2.0 m de espaciado, distribución cuadrada. En intersecciones usar Perno de 10 pies de forma sistemática espaciado a 1.8 m x 1.8 m en corona.
51 - 60	Regular	III-A	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno sistemático de 8 pies de largo de 1.5 m a 1.7 m de espaciado, distribución cuadrada. En intersecciones usar Pernos Rebar de 10 pies de forma sistemática espaciado a 1.8 m x 1.8 m en corona.
41 - 50	Regular	III-B	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno sistemático de 8 pies de largo de 1.2 m a 1.5 m de espaciado, distribución cuadrada. En intersecciones usar Pernos Rebar de 10 pies de forma sistemática espaciado a 1.5 m x 1.5 m en corona.
31 - 40	Mala	IV-A	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra más malla y perno sistemático de 8 pies de largo de 1.2 m a 1.5 m de espaciado y shotcrete sobre 1 pulg. de espesor sin fibra sintética. En intersecciones usar Pernos Rebar de 10 pies de forma sistemática espaciado a 1.2 m x 1.2 m en corona.
21 - 30	Mala	IV-B	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: colocar shotcrete 2 pulg. con fibra con malla + perno sistemático de 8 pies de largo de 1.0 m a 1.2 m de espaciado y shotcrete sobre 2 pulg. de espesor sin fibra sintética.
0 - 20	Muy Mala	V	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: colocar cimbras H6 galvanizadas espaciadas de 0.8 m a 1.0 m con planchas acanaladas topeadas con bolsacretos. Previamente colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintética como pre soporte.
De acuerdo a la calidad de roca se colocará pernos Rebar, Split Set o Swellex No se contempla realizar intersecciones en tipo de Roca IVB y Roca V			

Fuente: Área de geomecánica del Proyecto Chaquicocha UG (MYSRL, 2017).

2.2.10 Sostenimiento con pernos de anclaje

Según Osinergmin (2017), “los pernos de anclaje proporcionan esfuerzos a la roca desde el instante mismo de su colocación, logrando que sea partícipe del sostenimiento”. Los pernos son elementos de sostenimiento activo. Se diferencian por las características de anclaje o por su capacidad de deformarse. La elección del tipo de perno a utilizar para sostener se determinara por las características geotécnicas propias del macizo rocoso y el efecto que se requiere lograr con ellos.

Tabla 2.9 Características de pernos de anclaje

Propiedades de los pernos de anclaje		
Tipo de perno	Resistencia del límite elástico (ton)	Resistencia a la ruptura (ton)
5/8" perno mecánico	6.1	10.2 (grado 690MPa)
Split set (ss-33)	8.5	10.6
Split set (ss-39)	12.7	14
Swellex estándar	N/A	11
Swellex deformable	N/A	9.5
Super Swellex	N/A	22
20mm barra (#6)	12.4	18.5
22mm barra (#6)	16	23
25mm barra (#6)	20.5	30.8

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

2.2.11 Sostenimiento con Shotcrete

Considerando lo afirmado por Ucar (2004), el shotcrete o concreto lanzado es una mezcla de cemento y agregados finos que se proyecta perpendicularmente sobre la superficie a recubrir. Puede ser mezcla húmeda o mezcla seca.

En la actualidad se viene generalizando el uso de shotcrete reforzado con fibra sintética o acero. Además, se utilizan aditivos como plastificantes y acelerantes con la finalidad de disminuir el tiempo de fraguado manteniendo la curva de la resistencia inicial y sin afectar la resistencia final.

Según Osinergmin (2017), el shotcrete cumple la función de sellar la superficie de la roca cerrando las fracturas y evitando la caída de rocas sueltas, además, evita la descomposición y alteración de la roca al quedar expuesta producto del avance de las excavaciones.

Tabla 2.10 Mezcla referencial de concreto lanzado resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$

Componentes	Mezcla seca		Mezcla húmeda	
	kg/m3	% materiales secos	kg/m3	% materiales Húmedos
Cemento	420	19	420	18.2
Aditivo de sílice	50	2.2	40	1.7
Mezcla de agregados	1670	75.8	1600	69.2
Fibras de acero	50	2.2	50	2.2
Acelerante	13	0.6	13	0.6
Superplastificante	-	-	6 litros	0.2
Reductor de agua	-	-	2 litros	0.08
Incorporador de aire	-	-	si requiere	
Agua	controlado a la boquilla		180	7.8
Total	2203	100	2311	100

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

2.2.12 Factor de seguridad

Según Osinergmin (2017), el enfoque clásico utilizado en el diseño de estructuras de ingeniería es considera la relación entre la resistencia o soporte a la carga del sistema y la demanda o carga calculada actuando sobre el sistema. El factor de seguridad (FS) es una medición determinística de la relación entre las fuerzas resistentes (capacidad) y las fuerzas actuantes (demanda).

El factor de seguridad de una estructura se define como:

$$FS = C/D \dots\dots\dots \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

- FS : Factor de seguridad
- C : Capacidad de soporte de carga del sistema
- D : Fuerzas actuantes o demanda sobre el sistema

Existen tres posibles escenarios:

- Cuando $C > D$, luego $FS > 1$ el sistema es estable.
- Cuando $C < D$, luego $FS < 1$ el sistema es inestable.
- Cuando $C = D$, luego $FS = 1$ el sistema está en equilibrio límite.

El valor de FS convencionalmente consiste en colocar un valor prescrito mínimo de aceptación del diseño basado principalmente en la experiencia. Los valores de FS considerados como mínimos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.11 F.S. recomendado según plazo de estabilidad

Plazo	Rangos de FS
Estabilidad a largo plazo (LP)	>1.5
Estabilidad a mediano plazo (MP)	1.3-1.5
Estabilidad a corto plazo (CP)	1.1-1.3

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

Según Osinergmin (2017), el grado de confiabilidad de la función de capacidad (C) depende de la variabilidad de los parámetros de la resistencia a la ruptura del macizo rocoso, prueba de errores, procedimientos mineros, procedimientos de inspección. Similarmente la función de demanda (D) incluye factores de fuerza de carga gravitacional de la masa rocosa, aceleración sísmica, esfuerzos circundantes y ubicación del nivel freático.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Evaluación geomecánica: La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica del macizo. A partir de estos datos, la aplicación de las clasificaciones geomecánicas permite estimar la calidad del macizo rocoso (González de Vallejo, 2002).

Discontinuidades: son superficies de debilidad que imparten a la roca una condición de anisotropía de resistencia, es decir, denotan una interrupción en la integridad mecánica de la roca. Para fines descriptivos se utiliza el término genérico, discontinuidad, con el objetivo de referirse indistintamente a diaclasas, fallas, foliaciones y estratificaciones,

teniendo en cuenta que la resistencia al cizallamiento de estas superficies, siempre es menor que la resistencia de la roca intacta que constituye el macizo (Salcedo, 1988).

Matriz rocosa: Material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral (González de Vallejo, 2002).

Macizo rocoso: está compuesto por bloques de roca intacta separados por discontinuidades, tales como diaclasas, planos de estratificación, pliegues, zonas de cizalla y fallas. Estos bloques pueden tener diferentes grados de alteración, variando desde inalterados hasta disgregados (Gavilanes y Andrade, 2004).

Sostenimiento: se refiere a los elementos de soporte y refuerzo que tienen como finalidad asegurar, controlar y mantener estable las excavaciones subterráneas. Pueden ser utilizados individualmente o en combinación con otros (Osinegim, 2017).

Pernos de anclaje: Los pernos proporcionan esfuerzos a la roca desde el instante mismo de su colocación, logrando que sea partícipe del sostenimiento. Existen muchos tipos de pernos que se diferencian por la característica del anclaje (pernos de expansión, de adherencia o de fricción), o por su capacidad de deformarse (pernos rígidos o pernos dinámicos) (Osinegmin, 2017).

Concreto lanzado o Shotcrete: es un mortero que es transportado a través de mangueras y lanzado neumáticamente sobre la superficie a recubrir. Fraguando, endureciendo y adquiriendo considerable resistencia (Ucar, 2004).

Control de calidad de sostenimiento: El control de calidad de los elementos de sostenimiento es una estrategia de vital importancia que permitirá verificar las suposiciones iniciales adoptadas durante el diseño del sostenimiento, así como asegurar el rendimiento de los diversos elementos de soporte y refuerzo que se han instalado en el macizo rocoso (Osinegmin, 2017).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Ubicación Geográfica

Minera Yanacocha, se encuentra ubicada en la provincia y departamento Cajamarca, en la sierra norte de Perú, a 800 kilómetros al noreste de la ciudad de Lima. Su zona de operaciones está a 45 km al norte del distrito de Cajamarca, entre los 3 500 a 4 100 msnm. El centro geográfico tiene aproximadamente las siguientes coordenadas en el sistema UTM: 774 260 E, 9 227 050 N. En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de Minera Yanacocha.

El portal de ingreso hacia las labores del túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II se encuentra al nor-oeste del tajo abierto existente, sobre una plataforma ubicada a 3750msnm, y se muestra en los Anexos N° 1 y 2.

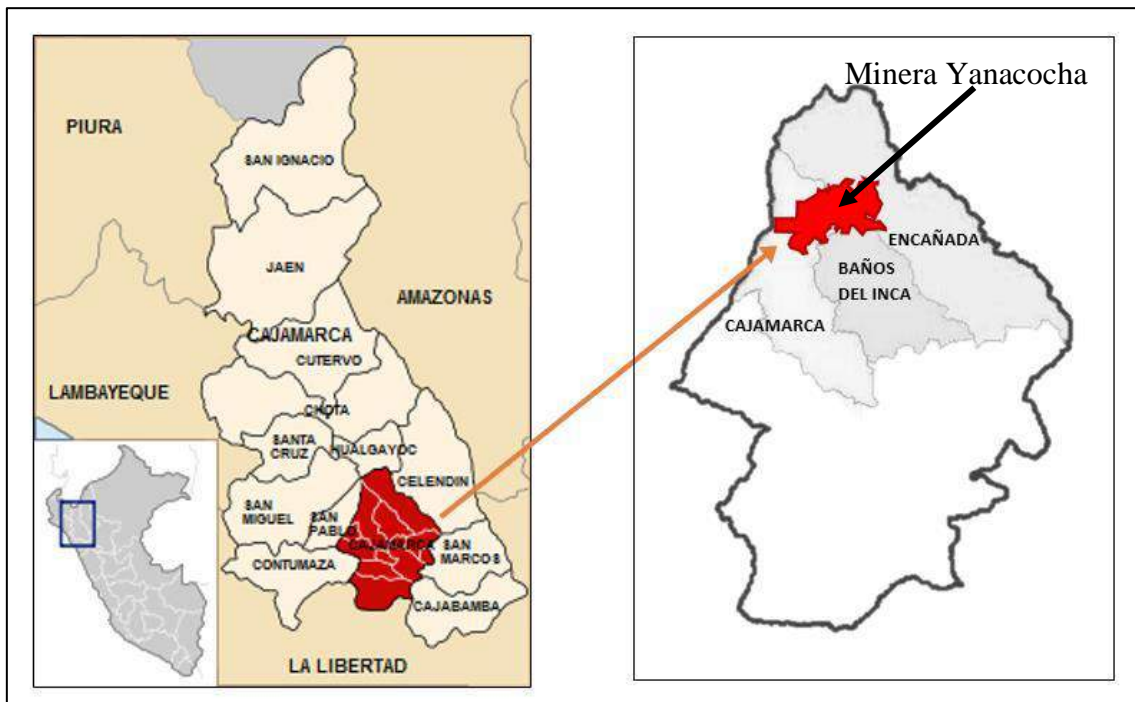


Figura 3.1 Ubicación geográfica de Minera Yanacocha.

3.1.2 Accesibilidad

El acceso a Minera Yanacocha desde la ciudad de Cajamarca es por medio de la carretera Cajamarca-Bambamarca, a una distancia promedio de 32 km, el tiempo de viaje desde Cajamarca hasta Minera Yanacocha (Garita Huandoy) es de aproximadamente 60 min.

El acceso hacia la ciudad de Cajamarca desde Lima (capital del Perú) puede ser mediante:

Vía terrestre: Puede realizarse en bus mediante un recorrido de 800 Km de distancia y un tiempo aproximado de 18 horas de viaje, a través de la carretera Panamericana Norte.

Vía aérea: Existen vuelos comerciales desde Lima (Aeropuerto Internacional Jorge Chávez) hacia Cajamarca (Aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias), empleando aproximadamente 1 hora de viaje.

3.1.3 Clima

Presenta un clima seco con fuertes precipitaciones en temporada de lluvias, así como tormentas eléctricas.

El clima del área de estudio es típico de las regiones andinas cercanas al ecuador: fresco y húmedo, con una temporada distintiva de lluvias. Las condiciones son a menudo de mucho viento, especialmente a gran altura (Saldaña, 2013).

El clima es frígido llegando a temperaturas menores a 3°C, dando lugar a continuas heladas en la temporada de lluvias. En la temporada seca se tiene intenso sol, fuertes vientos y temperaturas mayores a 20°C (Basurto, 2014).

3.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo de nivel correlacional y explicativo porque describe, define y explica la relación entre variables.

El diseño de la investigación es no experimental, transversal porque se analiza la realidad sin manipular las variables y el tiempo no es determinante. Usando el método deductivo – inductivo, partiendo de datos particulares a la generalización del área investigada considerando la caracterización geomecánica y estabilidad del túnel.

3.2.2 Población de estudio

Túnel de exploración Chaquicocha – Fase II, asociado a las características geomecánicas.

3.2.3 Muestras

Frentes de avance de las excavaciones, donde se realiza el muestreo y mapeo geomecánico.

3.2.4 Unidad de análisis.

Litología, geoestructuras, hidrogeología, tensiones e inestabilidad.

3.2.5 Definición de Variables

3.2.5.1 Variable Dependiente

Sostenimiento: Elementos de soporte y refuerzo que tienen como finalidad asegurar, controlar y mantener estable las excavaciones subterráneas.

3.2.5.2 Variable Independiente

Comportamiento geomecánico: Condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso que interactúan ante la actuación de fuerzas internas y externas que se ejercen sobre ellos.

Tabla 3.1 Operacionalización de variables

Tipo de variables	Variables	Definición conceptual	Indicadores
Independiente	Comportamiento geomecánico	Condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso que interactúan ante la actuación de fuerzas internas y externas que se ejercen sobre ellos.	Calidad del macizo rocoso: <ul style="list-style-type: none"> • Muy Buena • Buena • Regular • Mala • Muy mala
Dependiente	sostenimiento	Elementos de soporte y refuerzo que tienen como finalidad asegurar, controlar y mantener estable las excavaciones subterráneas.	Tipo de sostenimiento: <ul style="list-style-type: none"> • Activo • Pasivo • Mixto

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos usados en la investigación fueron recopilados entre los meses de octubre y diciembre del 2018. Tiempo que coincide con la construcción del túnel de exploración Chaquicocha – Fase II.

3.3.1 Técnicas

Observación directa: Para la recolección de información sobre los parámetros de evaluación del macizo rocoso. Cabe mencionar la medición de estos parámetros se realizada mediante el mapeo geomecánico en el frente de avance de las excavaciones utilizando las clasificaciones geomecánicas RMR Y GSI adaptadas por MYSRL.

Ensayos de laboratorio: Para obtener información respecto al rendimiento de los elementos del sostenimiento instalado en el túnel.

Análisis documental: Para la revisión de información bibliográfica como libros, revistas, tesis e informes referidos al tema de investigación. Asimismo, estándares y procedimientos de mina proporcionados por el área de geomecánica del Proyecto Chaquicocha UG – MYSRL.

3.3.2 Instrumentos, Materiales y Equipos

- Laptop: Para la redacción del informe, análisis y procesamiento de datos mediante los Softwares Dips y Phase2.

- Brújula: Para medir la orientación (DIP/DIP DIRECTION) de las discontinuidades.
- Martillo de Geólogo: Para estimar la resistencia de las rocas en campo.
- Formatos de Mapeo Geomecanico: para registrar información del levantamiento geotécnico en los frentes de avance.
- Colores y lápices: Para anotar en la libreta y en el formato de mapeo
- Libreta de Campo: Para realizar anotaciones necesarias en campo.
- Cámara Fotográfica: para registrar las evidencias en campo.
- Moldes para Paneles: Para extraer muestras de Shotcrete.
- Máquina cortadora de Muestras: Para cortar las muestras de Shotcrete en forma cilíndrica
- Máquina de arranque de Pernos (ENERPAC): Para realizar ensayos de tracción en pernos instalados.
- Penetrómetro.- Para medir las resistencias tempranas de Shotcrete.
- Máquina para ensayos de resistencia a la comprensión del Shotcrete.

3.4 PROCEDIMIENTOS

3.4.1 Etapa Preliminar

Consiste en la recopilación de información relacionada al tema de investigación mediante diferentes fuentes de acceso a la información, tal es el caso de libros, revistas, páginas de internet, normatividad vigente que regula las actividades relacionadas al tema de investigación, trabajos de investigación que se hayan realizado anteriormente.

Para realizar el presente trabajo de investigación se ha tenido en cuenta la normatividad vigente que regulan los procedimientos y estándares en minería y en particular en el área de Geomecanica, según el Decreto Supremo N° 023–2017–EM y su modificatoria D.S. N° 023–2017–EM, Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería: Guía de Criterios Geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de las labores subterráneas. Además, considerando como base las clasificaciones geomecánicas de mayor uso y aplicación en minería subterránea como son: RMR₈₉ y GSI adaptadas por parte del titular minero para la ejecución del proyecto Chaquicocha UG.

3.4.2 Etapa de Campo

Consiste en recolección de datos mediante el mapeo geomecánico en cada frente de avance de las labores, usando las clasificaciones geomecánicas de RMR y GSI adaptadas por MYSRL para el Proyecto Chaquicocha UG, para determinar la calidad del macizo rocoso y en consecuencia estimar el sostenimiento a ser instalado en las labores del túnel.

Además en esta etapa se realizan ensayos de control de calidad al sostenimiento instalado como ensayos de Pull Test en pernos, ensayos de resistencias tempranos y ensayos de compresión simple para el Shotcrete, entre otros. Se realizan estos controles con la finalidad de asegurar el rendimiento de los elementos de sostenimiento instalados en el túnel.

3.4.3 Etapa de Gabinete

Consiste en el análisis de estabilidad de labores mediante el uso del software Phase2 v 8.0 de la empresa Rocscience analizamos el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones presentes en el proyecto, determinando sobre todo la condición de estabilidad de las labores, como data utilizamos los resultados obtenidos en los mapeos geomecánicos, propiedades de los materiales, especificaciones técnicas de los elementos de sostenimiento, entre otros datos que sean necesarios. El análisis de se realiza en diferentes secciones de la labor, atendiendo principalmente a la calidad del macizo rocoso encontrado a lo largo de la construcción del túnel y en particular de la Rampa 3740. Inicialmente se analiza la labor sin sostenimiento y luego se realiza un análisis con el tipo y diseño de sostenimiento, estimado según las clasificaciones geomecánicas, para determinar la condición de estabilidad de la labor según el factor de seguridad obtenido.

3.5 GEOLOGÍA

La zona de Chaquicocha, consiste de rocas piroclásticas y derrames de lavas de composición dacítica a andesítica cortadas por intrusivos y brechas de similar composición. La alteración hidrotermal es típica de los depósitos de alta sulfuración con un núcleo silíceo que gradúa hacia los bordes a un ensamble argílico avanzado, argílico y propilítico. Siendo restringidas localmente a las fracturas y matriz de las brechas (Zamora, 2005).

La baritina y hematita se encuentra principalmente en fracturas, y la sílice cremosa como venillas y en la matriz de algunas brechas hidrotermales está asociada con la intrusión de brechas freatomagmáticas y stocks de composición dacítica. Los sulfuros presentes son esencialmente azufre, enargita, covelita y pirita. Los eventos volcánicos, intrusiones y etapas de alteración hidrotermal relacionados con la mineralización de oro, fueron controladas principalmente por fallas mayores de dirección NW-SE.

El Macizo Rocosó, consta en depósitos de derrames volcánicos de la era terciaria que recubren un basamento cretáceo. Han sido clasificadas en cinco unidades principales:

- Intrusivos y piroclásticos jóvenes.
- Andesita superior.
- Piroclásticos ricos en líticos.
- Piroclásticos principales.
- Andesita inferior, estas unidades principales, según se describe en el estudio realizado por LORAX Environmental.

3.5.1 Alteración

Las alteraciones definidas por el Área de geología de MYSRL, han sido correlacionadas con la calidad del macizo rocoso.

La silicificación es el más importante tipo de alteración en el área y hospeda la principal mineralización, constituida esencialmente por sílice masiva y en menor proporción por sílice “vuggy” y sílice granular.

Sílice masiva, consiste de un cuarzo microcristalino muy denso, entre 10-30um de tamaño. Esta extensivamente desarrollado en la zona de Chaquicocha, formando grandes masas sub horizontales de hasta 400m de espesor, por tal constituye la principal parte del depósito.

Sílice vuggy, consiste de cuarzo de grano fino con cavidades o moldes de fenocristales que varían desde 1mm a 1cm.

Sílice granular, consiste de cuarzo remanente friable, poco compactada y de textura sacaroides, producido por fluidos ácidos. Ocurre en los niveles superiores en Chaquicocha, y está restringida a los tufos líticos blancos y brechas freáticas tardías (Turner, 1997)

La rampa 3740 y labores contiguas a la misma han sido desarrolladas sobre las alteraciones de sílice masiva.

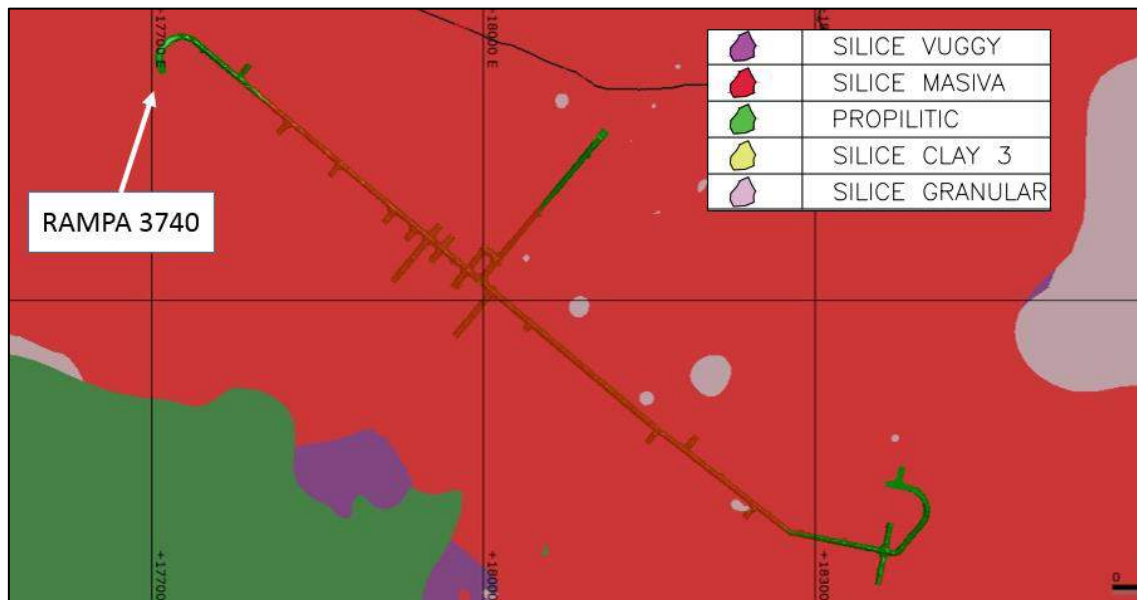


Figura 3.2 Alteraciones geológicas Chaquicocha UG - Nv. 3750.

3.5.2 Geología Estructural

La característica estructural más importante en la región es el lineamiento transandino que forma el corredor estructural Chicama – Yanacocha Este corredor alberga una serie de fallas de dirección NE, emplazamiento de intrusivos, y controla la localización de varios pórfidos y yacimientos de alta sulfuración (Quiroz, 1997).

Un conjunto de fallas de rumbo general NW-SE se disponen con ligeras variaciones de rumbo, definiendo el corredor estructural Yanacocha –Hualgayoc, de 5 a 6 Km de ancho (Quiroz, 2002).

A lo largo de este corredor se disponen coincidentemente una serie de ocurrencias de mineralización tanto dentro como fuera del distrito de Yanacocha.

Dentro del distrito de Yanacocha se observa un alineamiento de dirección NE definido por la sucesión de depósitos que constituyen parte del Complejo Volcánico Yanacocha.

Entre ellos tenemos al Cerro Yanacocha, Carachugo, Maqui Maqui, **Chaquicocha**, Cerro Negro, Cerro Quillish, el Tapado y La Quinoa (Quiroz, 2002).

3.5.3 Generalidades del Proyecto Chaquicocha UG

El Proyecto Chaquicocha UG, consiste en la exploración de un yacimiento, que actualmente tiene la concesión Minera Yanacocha. El proyecto adquiere el mismo nombre del tajo donde actualmente se encuentra paralizadas las operaciones de open pit. El proyecto denominado “Construcción del Túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II” comprende las labores Rampa 3740, Crucero 505 SW, Crucero 544 SE, Crucero 582 SW Crucero 621 NW, entre otras. Se ubica dentro de las instalaciones de MYSRL y comprende el desarrollo de 1350m lineales de labores subterráneas.

Administración de Empresas S.A. (AESAs), como parte del programa de exploraciones, viene ejecutado el proyecto de construcción del túnel de exploración Chaquicocha – Fase II, donde se ejecutan las siguientes actividades que cumplen un ciclo de minado: marcado de malla de perforación, perforación del frente, carguío de explosivos, voladura, ventilación, riego con agua a presión, limpieza del frente, desatado de rocas, sostenimiento mecanizado (pernos de anclaje, colocación de malla y lanzado de Shotcrete vía húmeda) siendo todas estas actividades ejecutadas en forma mecanizada, eliminado todo tipo de trabajo manual.

Para el Túnel de Exploración Chaquicocha, Nivel 3750, se emplearon secciones en arco de 5.0m Ancho x 5.5m Alto para labores principales, secciones de 5.0m ancho x 5.0m alto para labores secundarias y secciones cuadradas de 3.0m ancho x 3.0m alto para refugios de peatones.

La rampa 3740 (+), donde se realiza la investigación, es una labor minera de longitud 195 metros, cuya es en forma de arco de dimensiones 5.00m de ancho x 5.50m de altura, en forma de espiral con pendiente 13% positiva (Ver Anexos N° 2 y 3). El portal de ingreso hacia las labores subterráneas de encuentra al nor-oeste del tajo abierto sobre una plataforma ubicada a 3750msnm.

3.6 DISTRIBUCIÓN DE DISCONTINUIDADES

Para el análisis de estructuras se ha utilizado el software Dips, con el cual se ha determinado, la orientación de las discontinuidades, mediante los diagramas. Por la característica de la forma de la Rampa 3740; se ha dividido en cuatro tramos (Figura N° 3.3) para analizar las condiciones de estabilidad según la orientación de las discontinuidades respecto al eje de la labor.

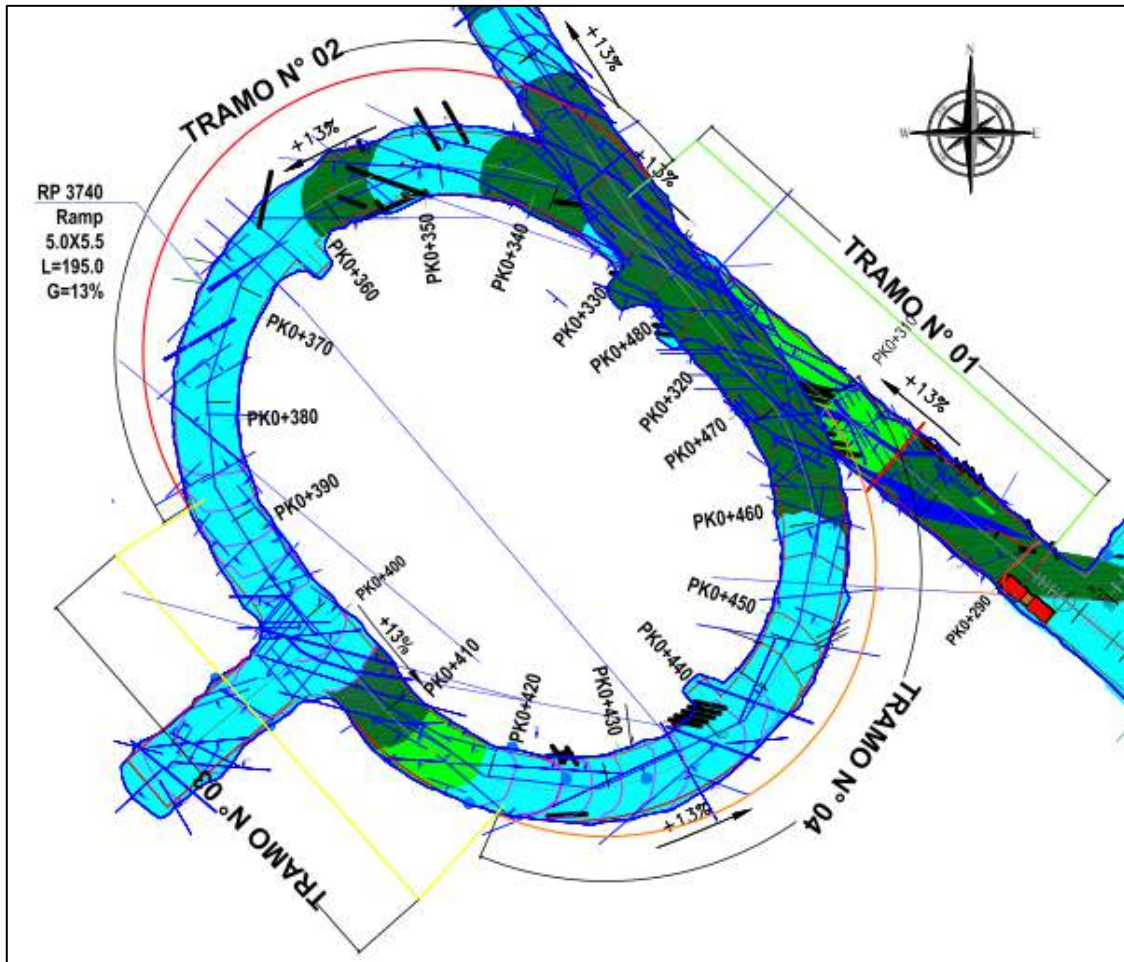


Figura 3.3 Tramos de la Rampa 3740, para el análisis de estructuras

3.6.1 Tramo N° 01: PK 0 + 290 a 0 + 340

En el tramo indicado tenemos un macizo rocoso de calidad regular tipo III-B, IIIA y en menor proporción roca buena tipo II, predominando un sistema estructural principal y dos sistemas secundarios de discontinuidades sub paralelas entre sí. El primero (S1) con orientación NW–SE teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECTION) 68/216, sistema principal. El segundo (S2) con orientación NW–SE con DIP/DIP DIRECTION 46/238, sistema secundario. El tercero (S3) con orientación NW–SE con DIP/DIP DIRECTION 73/248, Sistema secundario. Los tres sets de discontinuidades se encuentran sub paralelas al avance de la labor. Considerado como condición desfavorable a muy desfavorable, generando inestabilidad especialmente en la corona de la labor.

Tabla 3.2 Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 01

SET	DIP	DIP DIRECTION
S1	68	216
S2	46	238
S3	73	248

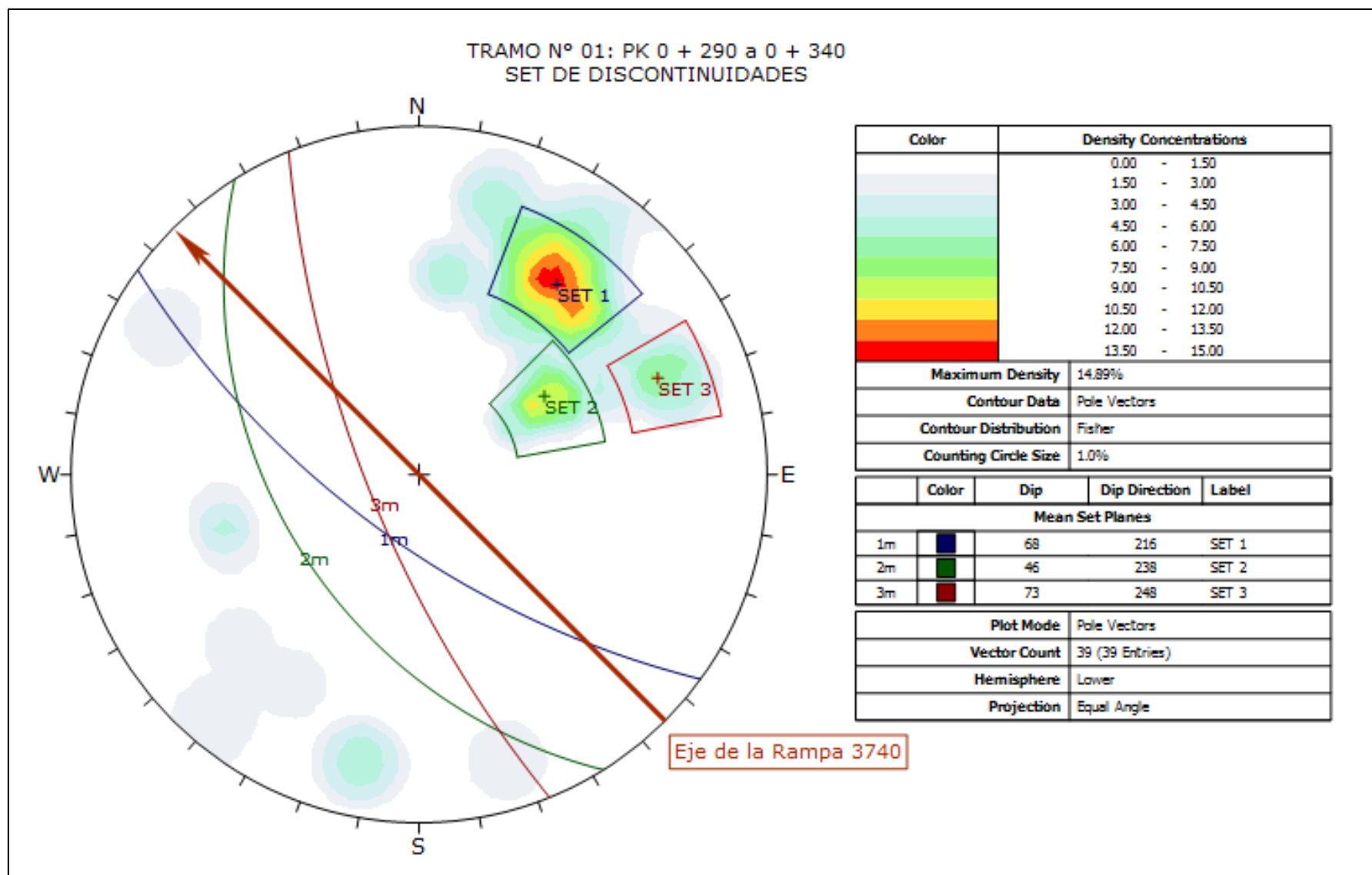


Figura 3.4 Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 01

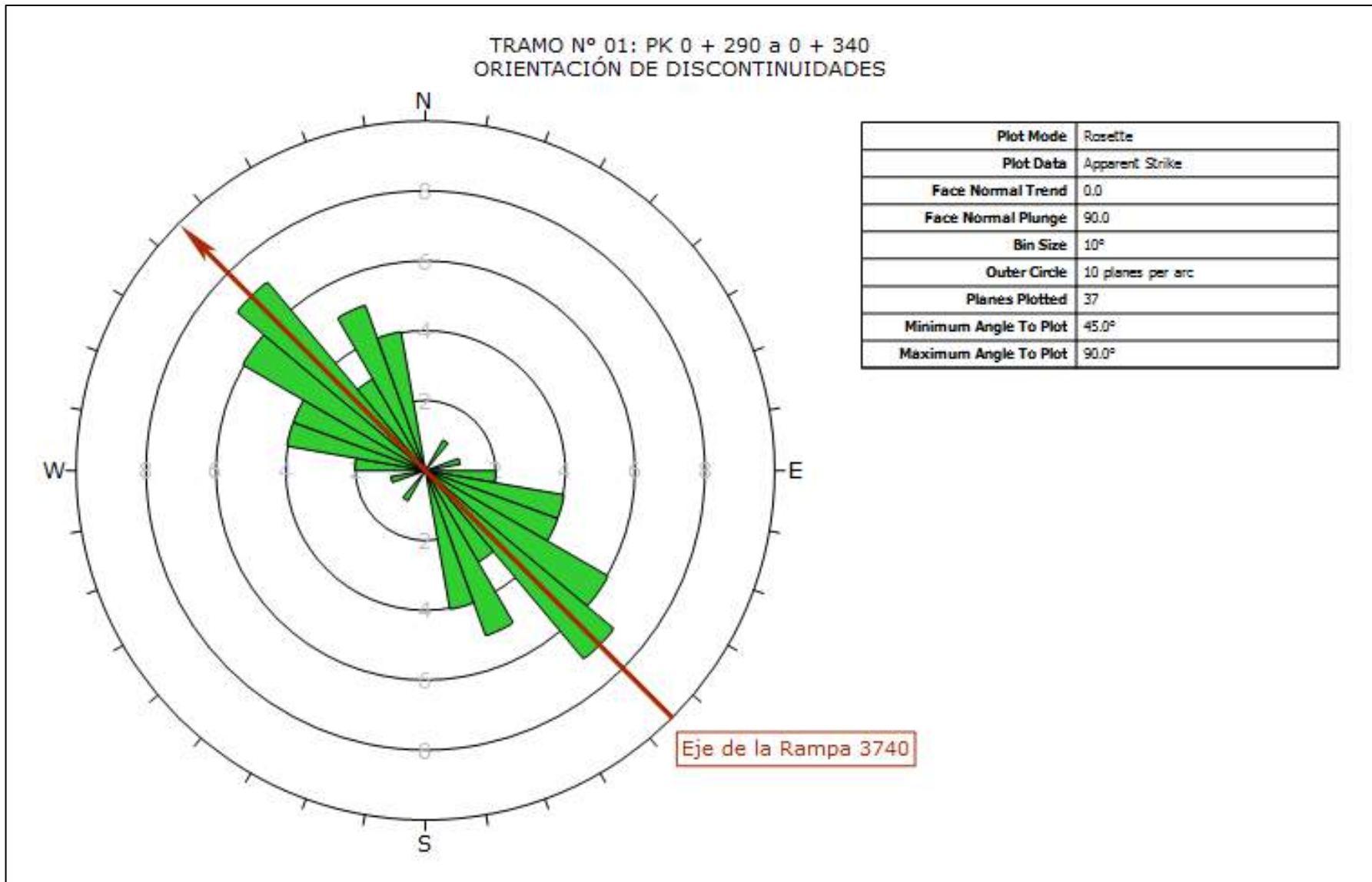


Figura 3.5 Orientación de discontinuidad respecto al eje del túnel en el tramo N° 01

3.6.2 Tramo N° 02: PK 0 + 340 a 0 + 380

El macizo rocoso en el tramo es de calidad buena tipo II y en menor proporción regular tipo III; donde predominan dos sistemas principales de discontinuidades y en menor medida dos sistemas secundarios. El primero (S1) con orientación SW-NE con DIP/DIP DIRECTION 64/144, sistema principal. El segundo (S2) con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECTION 69/195, sistema principal. El tercero (S3) con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCION 80/240, sistema secundario. El cuarto (S4) con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECTION 79/333, sistema secundario. Estos sistemas de discontinuidades se encuentran en forma diagonal y perpendicular al avance de la Rampa 3740, considerado como condición media a desfavorable, generando principalmente inestabilidad en la corona de la labor.

Tabla 3.3 Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 02

SET	DIP	DIP DIRECTION
S1	64	144
S2	69	195
S3	80	240
S4	79	333

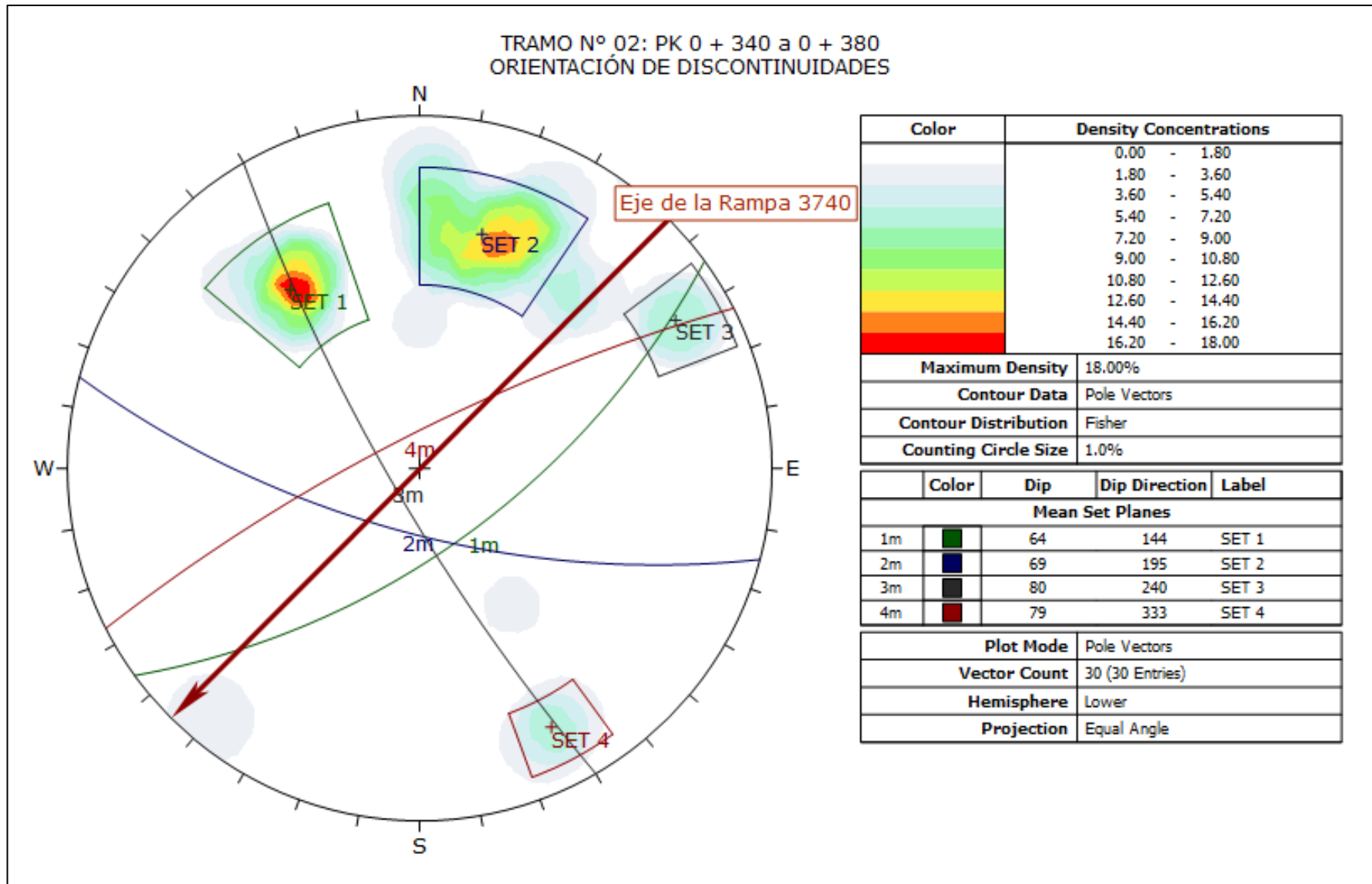


Figura 3.6 Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 02

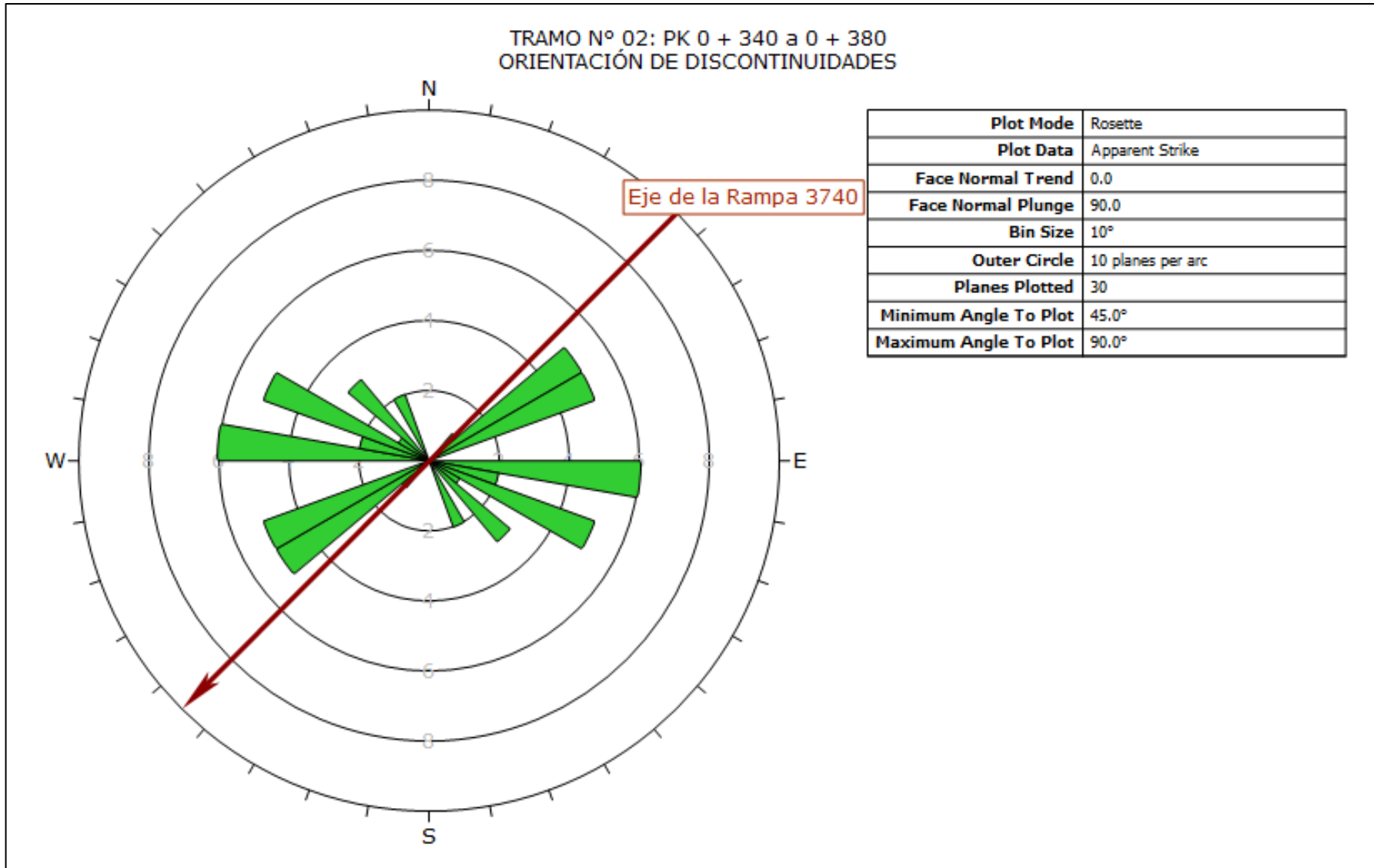


Figura 3.7 Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 02

3.6.3 Tramo N° 03: PK 0 + 380 a 0 + 420

En el tramo encontramos un macizo rocoso mayormente de calidad buena tipo II y en menor proporción regular tipo III-A y III-B, donde predominan dos sistemas estructurales principales y dos secundarios de discontinuidades. El primero (S1) con orientación NW-SE teniendo como DIP/DIP DIRECTION 75/230, sistema principal. El segundo (S2) con orientación SE-NW con DIP/DIP DIRECTION 73/14 Sistema Secundario. El tercero (S3) con orientación SW-NE con DIP/DIP DIRECTION 69/140, Sistema secundario. El cuarto (S4) con dirección SW-NE con DIP/DIP DIRECTION 77/179. Así tenemos que el sistema S1 se encuentra sub paralelo al eje de la labor, el sistema S2 y S3 cortando en forma diagonal al avance con dirección de buzamiento opuestos entre sí, generando la formación de cuñas en la corona de la labor y el sistema S4 con orientación perpendicular al eje del túnel. Estas condiciones son consideradas desfavorables para la estabilidad de la labor.

Tabla 3.4 Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 03

SET	DIP	DIP DIRECTION
S1	75	230
S2	73	14
S3	69	140
S4	77	179

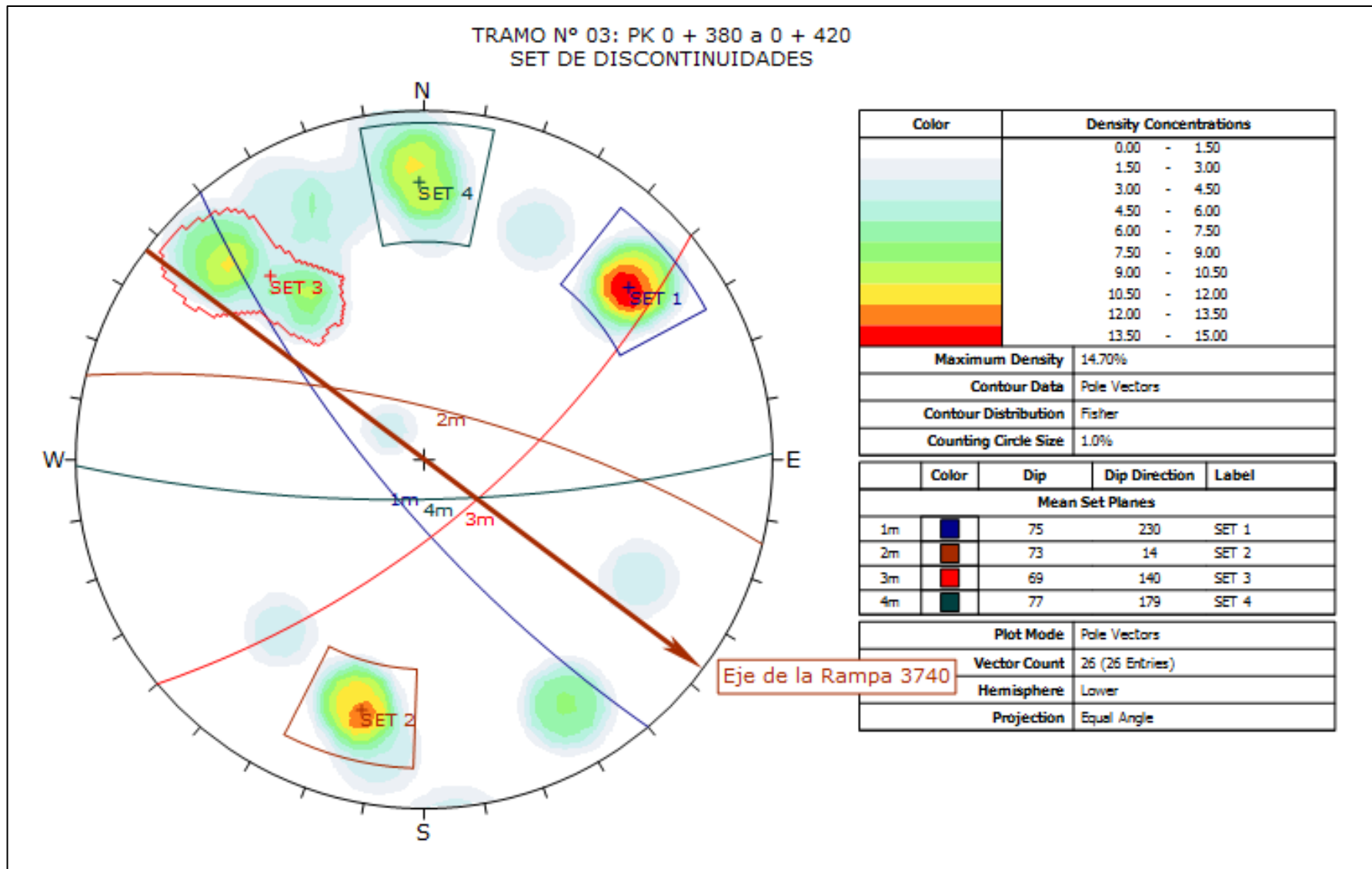


Figura 3.8 Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 03.

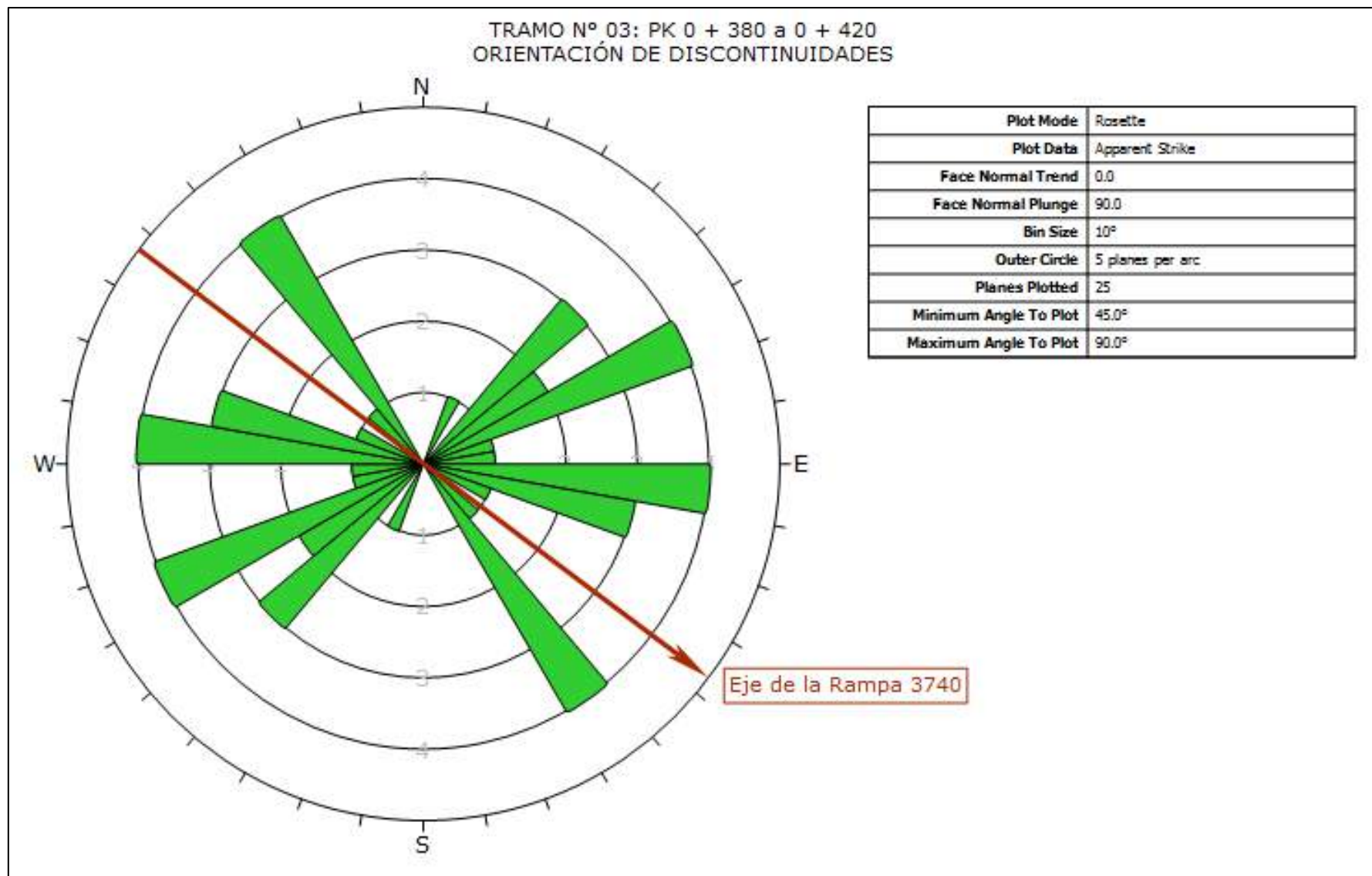


Figura 3.9 Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 03.

3.6.4 Tramo N° 04: PK 0 + 420 a 0 + 460

En gran parte del tramo el macizo rocoso es de calidad buena tipo II y una pequeña proporción de regular tipo III-A. Predominan dos sistemas principales de discontinuidades y un sistema secundario. El primero (S1) con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECTION 73/193, sistema principal. El segundo (S2) con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECTION 82/155, sistema principal. El tercero (S3) con orientación SE-NW con DIP/DIP DIRECTION 75/4, sistema secundario. Los sistemas principales cortan de manera perpendicular y el sistema secundario lo hace de manera diagonal al eje de la labor, considerándose como condición de estabilidad regular a favorable.

Tabla 3.5 Sistemas de discontinuidades en el tramo N° 04

SET	DIP	DIP DIRECTION
S1	73	193
S2	82	155
S3	75	4

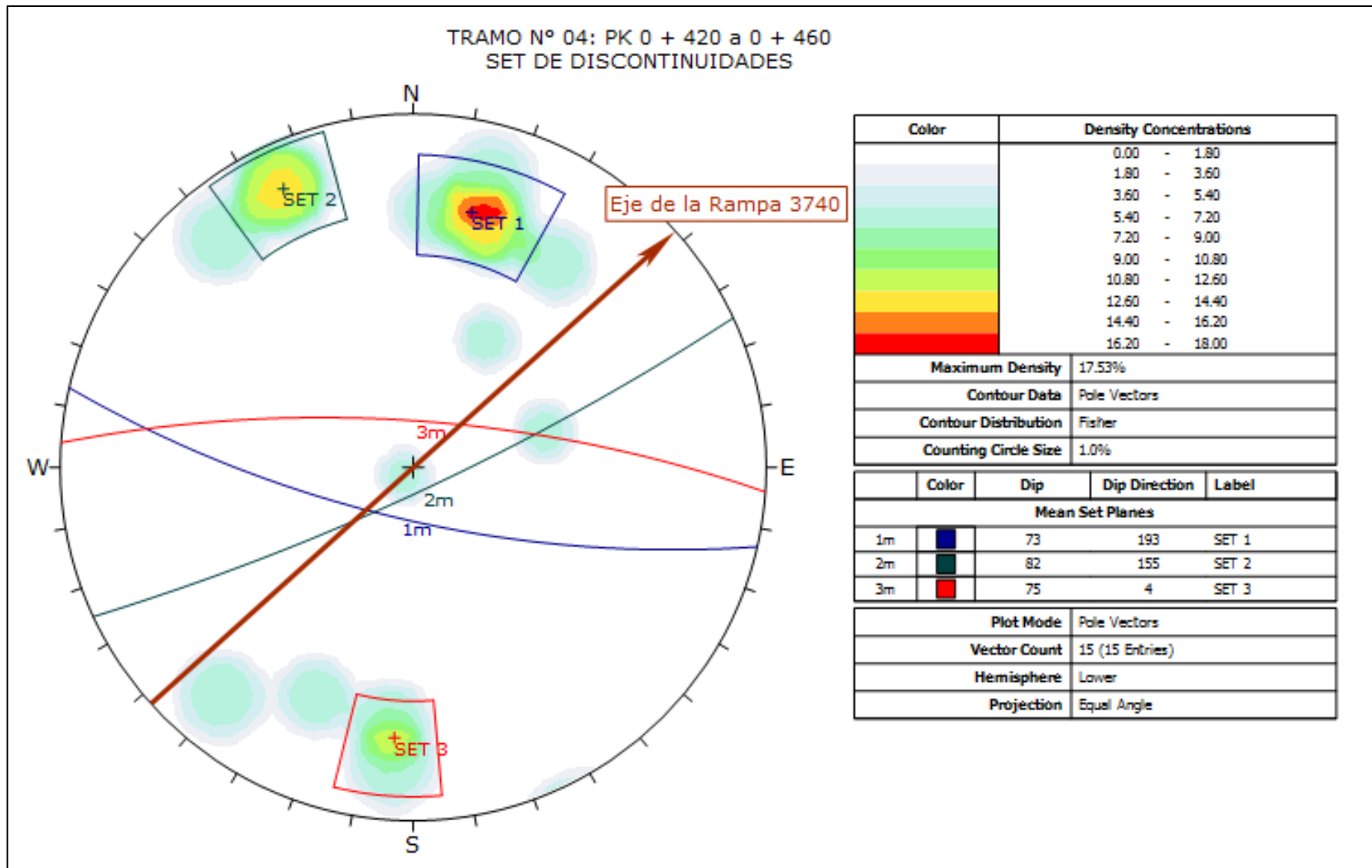


Figura 3.10 Sistemas de discontinuidades presentes en el Tramo N° 04

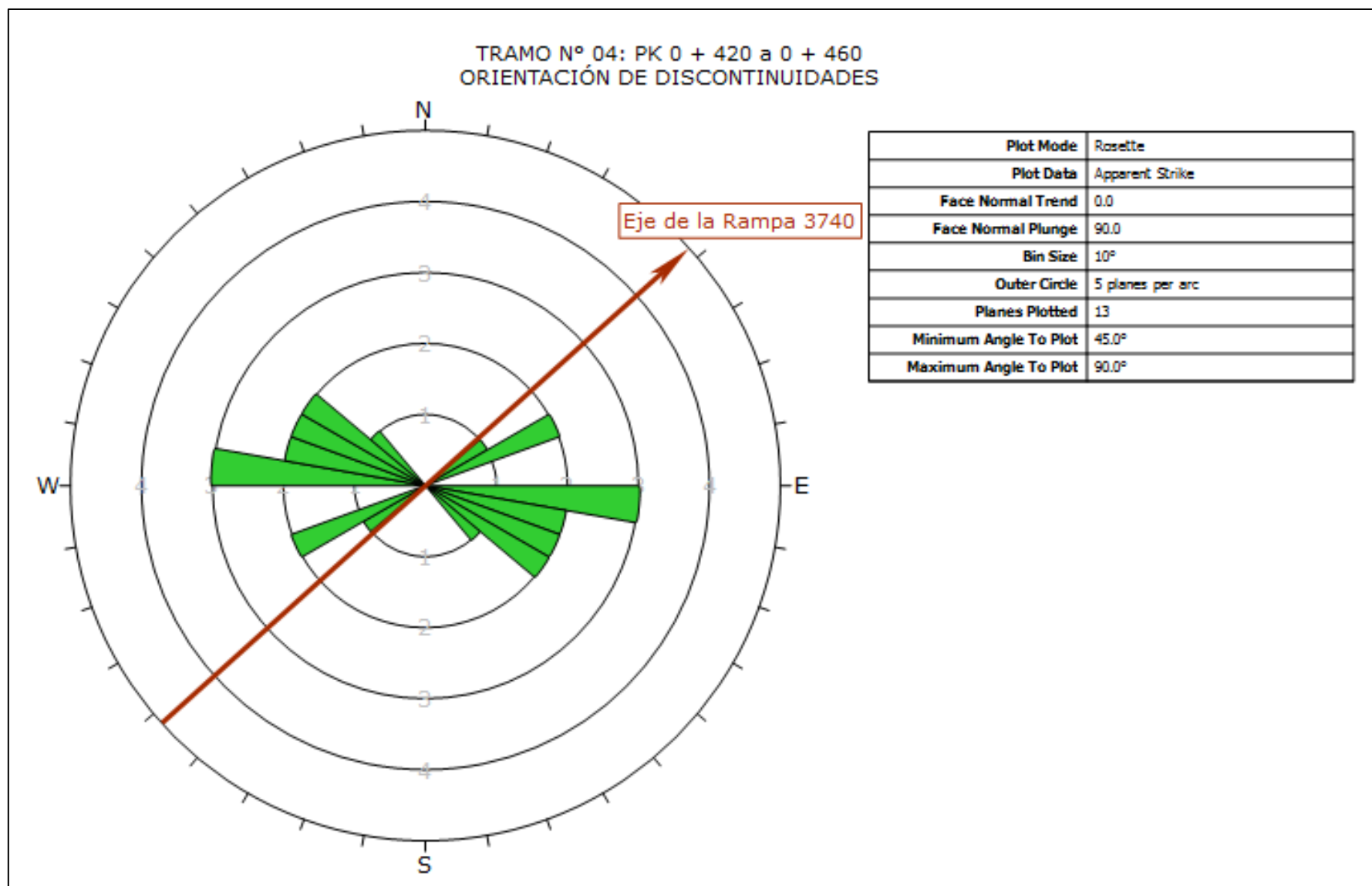


Figura 3.11 Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel en el tramo N° 04

3.7 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

Los parámetros geotécnicos del macizo rocoso y las condiciones a lo largo de toda la longitud de la labor ejecutada se definieron con la información disponible, incluyendo la estimación RMR y GSI vigente MYSRL, con los siguientes factores:

- Resistencia de la roca intacta
- RQD.
- Espaciamiento entre discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades
- Predicción de flujos de aguas subterráneas,
- Orientación estructural con respecto al laboreo.

3.7.1 Evaluación Geotécnica del Frente

El control geotécnico del túnel tiene, como herramienta, el levantamiento geotécnico del frente y su caracterización Geomecánica. Llámese al mapeo geoestructural de las discontinuidades (fallas y diaclasas) muy importantes para determinar el comportamiento de cuñas, familias principales de las estructuras y datos geotécnicos que permiten la obtención de parámetros objetivos de valoración. Determinando así; la calidad de macizo rocoso excavado, que sirve como herramienta de decisión para el tipo de sostenimiento.

La principal herramienta de evaluación es el sistema de clasificación GSI vigente en MYSRL (Anexo N° 7) que se determina por el grado de fracturamiento y la resistencia de la roca para determinar el sostenimiento a usar

El levantamiento geotécnico se realiza generalmente, después de finalizar la excavación, cuando las condiciones de seguridad lo permitan, el especialista geotécnico realizará la clasificación mediante el llamado mapeo geotécnico de celdas y líneas de detalle, realizado con huincha y brújula apropiada para tomar el buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIR).

3.7.2 Resistencia de la roca

Este importante índice se obtiene mediante observaciones de terreno y el uso del martillo de geólogo de acuerdo al método de estimación de ISRM (Ver Tabla N° 1) y a través de ensayos de resistencia a la carga puntual realizados en laboratorio.

Tabla 3.6 Ensayos de resistencia a la carga puntual

Fecha	Labor	Progresiva	Promedio Is(50) (Mpa)	Promedio UCS (MPa)
16/10/2018	Rampa 3740	0+315.5	2.77	63.81
07/11/2018	Rampa 3740	0+370.0	6.25	143.64
23/11/2018	Cx 582 SW	0+12.7	5.3	121.84
05/12/2018	Rampa 3740	0+412.5	2.93	67.37
12/12/2018	Rampa 3740	0+452.3	4.51	103.84

3.8 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TÚNEL

A continuación se muestra el resumen de la caracterización geotécnica en las labores de túnel. Cada mapeo geomecánico corresponde a un tramo excavado, en el cual se determinó la calidad del macizo y la estimación del sostenimiento. A cada excavación le corresponde un mapeo geotécnico, dicho mapeo ha sido agrupado según los valores similares. En el Anexo N° 4. Podemos apreciar la zonificación geomecánica del túnel según la calidad de roca.

Tabla 3.7 Caracterización geomecánica del túnel

Labor	Progresivas			Calidad Geotécnica		
	Desde	Hasta	Avance	RMR	Calidad	Tipo
RAMPA 3740	290	303.5	13.50	51 - 60	Regular	III-A
	303.5	324	20.50	41 - 50	Regular	III-B
	324	334.5	10.50	61 - 80	Buena	II
	334.5	345	10.50	51 - 60	Regular	III-A
	345	354.5	9.50	61 - 70	Buena	II
	354.5	360.5	6.00	51 - 60	Regular	III-A
	360.5	405	44.50	61 - 80	Buena	II
	405	411	6.00	51 - 60	Regular	III-A
	411	418	7.00	41 - 50	Regular	III-B
	418	460	42.00	61 - 80	Buena	II
Cx 505 SW*	0.00	2.00	2.00	51 - 60	Regular	III-A
Cx 544 SE*	0.00	2.00	2.00	61 - 80	Buena	II
Cx 582 SW	0.00	16.00	16.00	61 - 80	Buena	II
Cx 621 NW*	0.00	2.00	2.00	61 - 80	Buena	II
* Refugio peatonal						

3.9 SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL

3.9.1 Aplicación del índice RMR para el diseño del sostenimiento

En este sistema el índice RMR se consigue con la suma de cinco números. Estos cinco números van en función de la resistencia a compresión simple de la roca matriz, el RQD, el espaciamiento de las discontinuidades, la condición de las discontinuidades y la condición del agua. Dependiendo del estado de las características indicadas, conseguirán una puntuación determinada y mediante la suma de dichas puntuaciones se conseguirán unos valores, que se situaran entre 0 y 100. Una vez obtenido el RMR básico, se procede a ajustar este número en función de la relación entre la orientación de las discontinuidades del túnel (Ver Tablas N° 2.3 y 2.4).

3.9.2 Definición del sostenimiento mediante el índice RMR MYSRL

Las recomendaciones para excavación y sostenimiento de túneles según el sistema RMR₈₉ (Ver Tabla 2.7), han sido modificadas por MYSRL para el Proyecto Chaquicocha UG, pero mantiene su esencialmente el mismo principio (Ver Tabla 2.8). Estas recomendaciones se añadieron a la clasificación para estimar el diseño de sostenimiento de la labor según la calidad y tipo del macizo rocoso. El sostenimiento instalado en la labor consiste en shotcrete reforzado con fibra sintética, instalación de pernos Split Set, malla electro soldada y pernos helicoidales. Es decir, una combinación entre los elementos de soporte y refuerzo formando un sostenimiento mixto.

En la Tabla 3.8 se detalla el diseño e instalación sostenimiento según la calidad del macizo rocoso del túnel.

Tabla 3.8 Diseño e instalación del sostenimiento en el túnel

Labor	Progresivas			Calidad Geotécnica			
	Desde	Hasta	Avance	RMR	Calidad	Tipo	Sostenimiento
RAMPA 3740	290	303.5	13.50	51 - 60	Regular	III-A	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado
	303.5	324	20.50	41 - 50	Regular	III-B	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.2m de espaciado
	324	334.5	10.50	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
	334.5	345	10.50	51 - 60	Regular	III-A	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado
	345	354.5	9.50	61 - 70	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
	354.5	360.5	6.00	51 - 60	Regular	III-A	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado
	360.5	405	44.50	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
	405	411	6.00	51 - 60	Regular	III-A	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado
	411	418	7.00	41 - 50	Regular	III-B	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.2m de espaciado
	418	460	42.00	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
Cx 505 SW*	0.00	2.00	2.00	51 - 60	Regular	III-A	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado
Cx 544 SE*	0.00	2.00	2.00	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
Cx 582 SW	0.00	16.00	16.00	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado
Cx 621 NW*	0.00	2.00	2.00	61 - 80	Buena	II	Shotcrete 2" reforzado con fibra sintética, perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado

* Refugio peatonal

3.10 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE EXCAVACIONES

Mediante el uso del software Phase2 V 8.0 de la empresa Rocscience, se realizó el modelamiento geomecánico considerando el criterio de falla de Hoek y Brown, a fin de verificar las condiciones de seguridad y estabilidad del túnel. La evaluación se realiza en determinados puntos del túnel tanto en condiciones naturales y considerando las recomendaciones de sostenimiento para cada tipo de roca.

Se realizó el análisis con base en los valores obtenidos de la caracterización geomecánica, estimación de tensiones según la teoría de Sheorey, datos técnicos de los elementos del sostenimiento y consideraciones técnicas de diseño del sostenimiento. Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figuras 3.12 – 3.17.

3.10.1 Modelamiento geomecánico en Roca Regular Tipo III-B

Se ha realizado el análisis en la Rampa 3740, Progresiva 0+310

Sin sostenimiento: La evaluación se realiza en condiciones naturales obteniéndose un factor de seguridad de 0.95 en la corona de la labor. Esto indica que la capacidad de soporte del macizo es menor a las fuerzas que actúan sobre la excavación por lo que requiere ser sostenida.

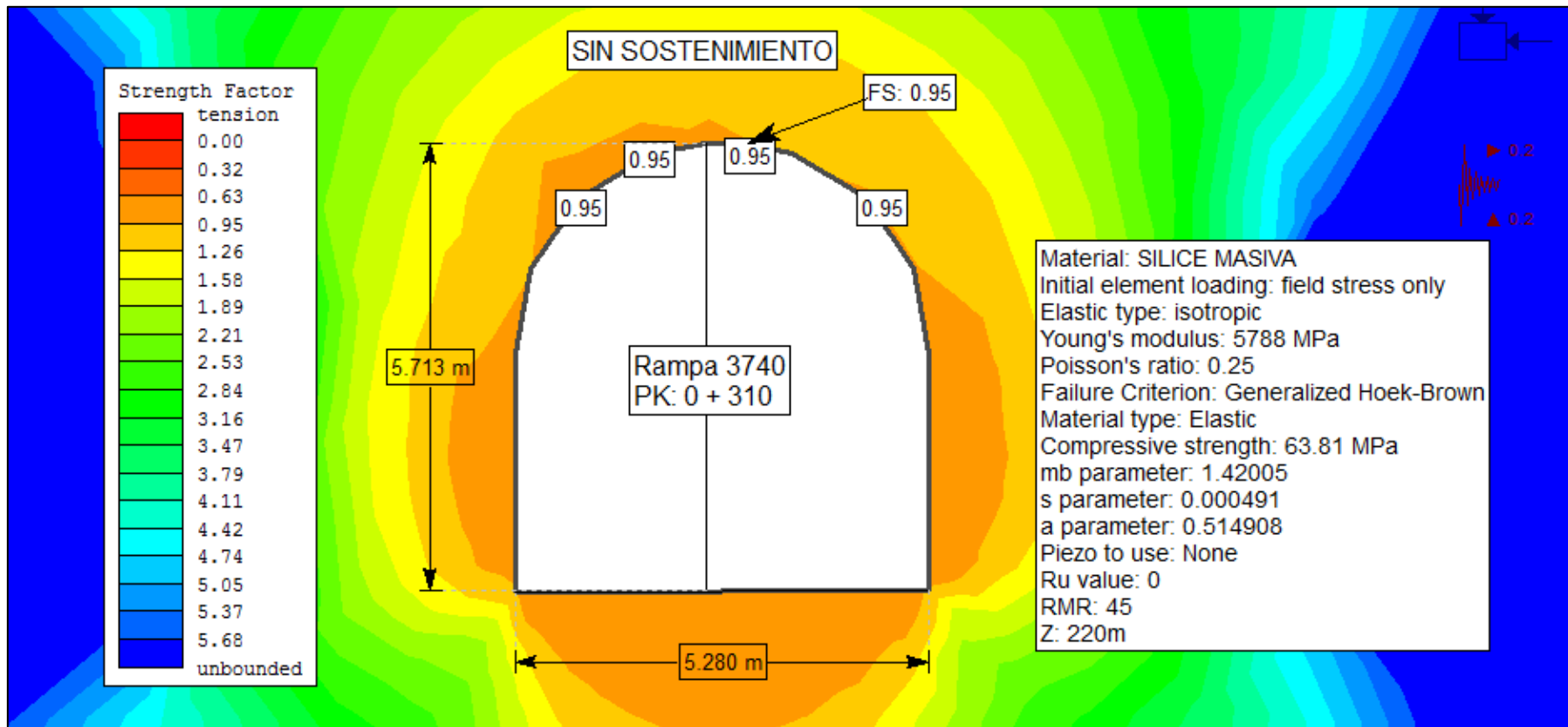


Figura 3.12 Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-B

Con Sostenimiento: Considerando la recomendación de sostenimiento, shotcrete 2 pulgadas reforzado con fibra sintética y pernos Split Set de 8 pies de largo a 1.2m de espaciado. Se obtiene un factor de seguridad mayor a 1.58; lo cual indica que bajo estas condiciones de sostenimiento la labor es estable y segura.

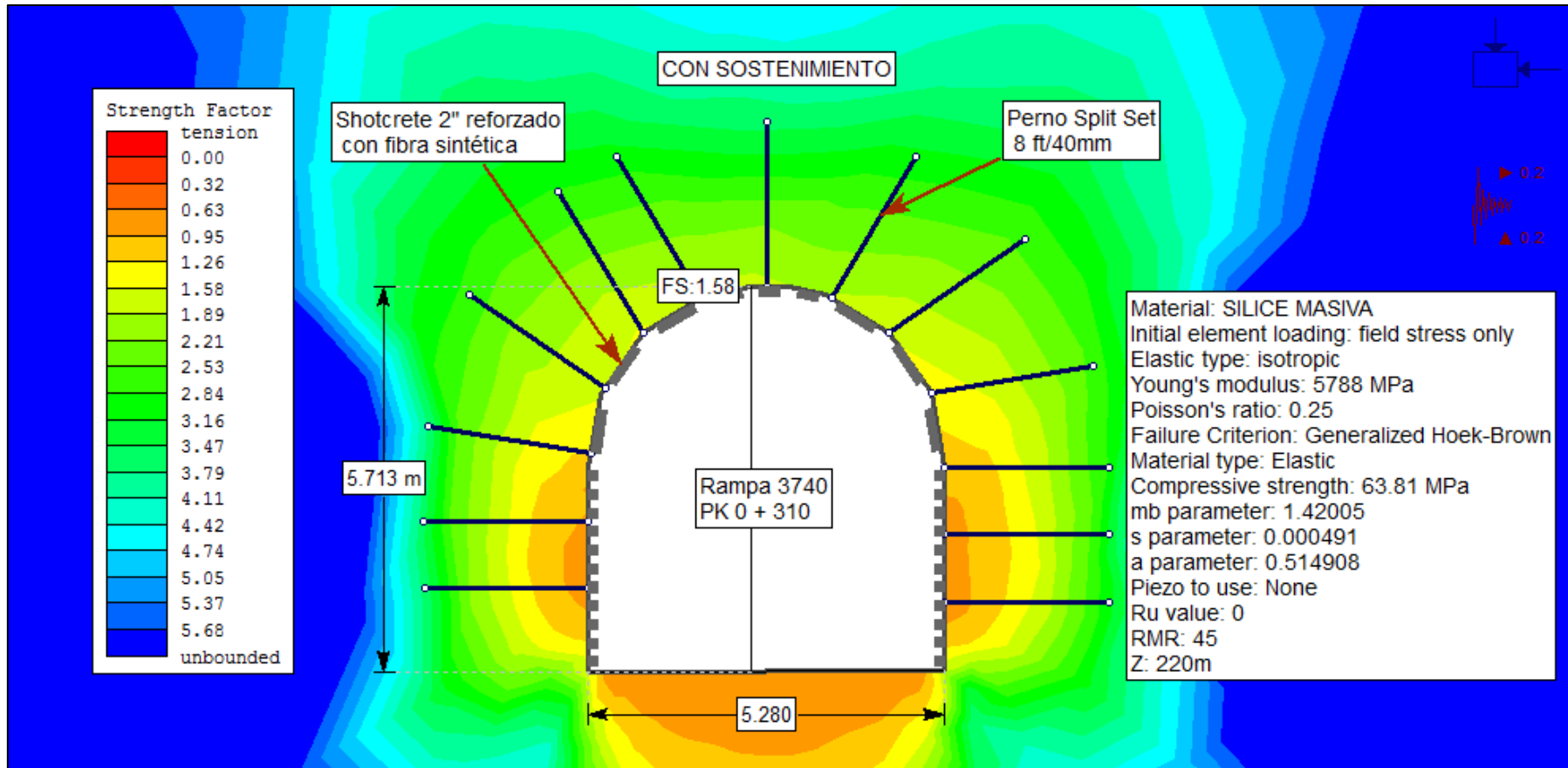


Figura 3.13 Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-B

3.10.2 Modelamiento geomecánico en Roca Regular Tipo III-A

Se ha realizado el análisis en la Rampa 3740, Progresiva 0+340

Sin sostenimiento: La evaluación se realiza en condiciones naturales obteniéndose un F.S.: 1.05 en la corona de la labor. Este valor indica que el sistema se encuentra en equilibrio límite y requiere sostenimiento al tratarse de una labor permanente.

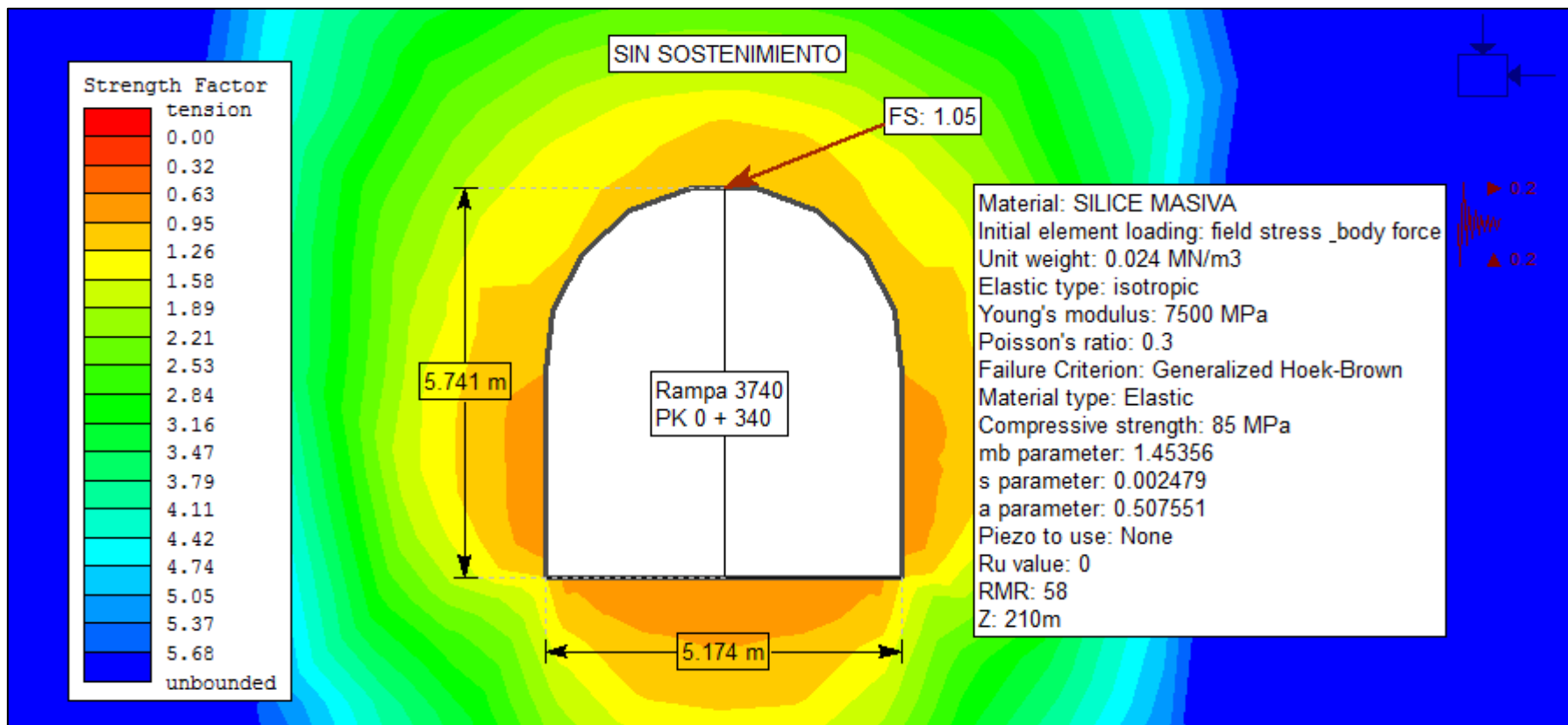


Figura 3.14 Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-A

Con sostenimiento: Considerando la recomendación de sostenimiento; shotcrete 2 pulgadas con pernos Split Set de 8 pies de longitud y 1.5m de espaciamento. Se obtiene un F.S.: 1.65. Este resultado indica que que la instalacion del sostenimiento aumenta la capacidad de resistencia del macizo generando asi condiciones estables en la labor.

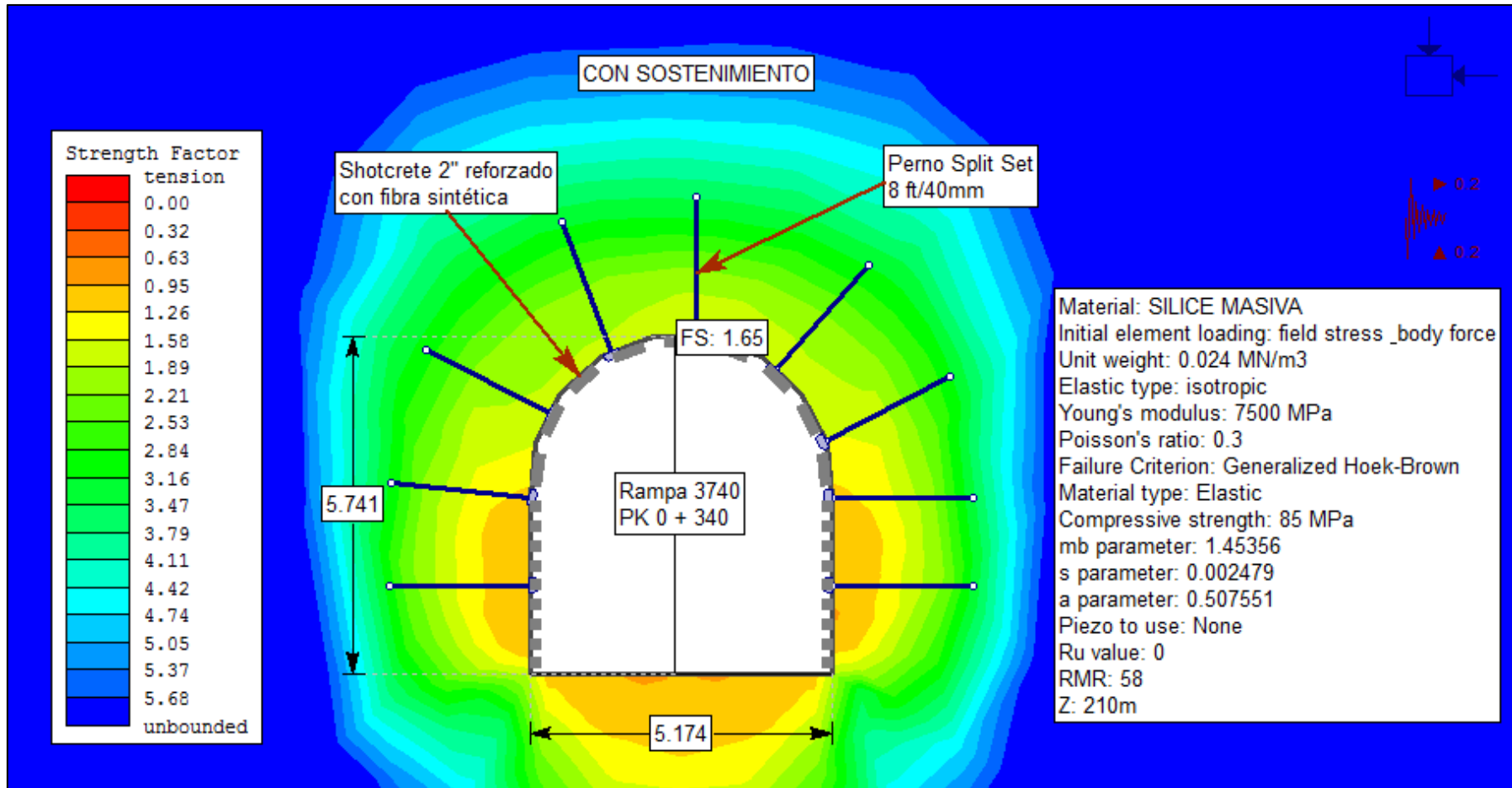


Figura 3.15 Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad regular tipo III-A

3.10.3 Modelamiento geomecánico en Roca Buena Tipo II

Se ha realizado el análisis en la Rampa 3740, Progresiva 0+370

Sin sostenimiento: En la evaluación realizada se obtiene un F.S.: 1.11. Esto indica que la capacidad de resistencia del macizo es ligeramente mayor a las fuerzas que actúan sobre la excavación; por lo tanto, no genera condiciones seguras de estabilidad para una labor permanente.

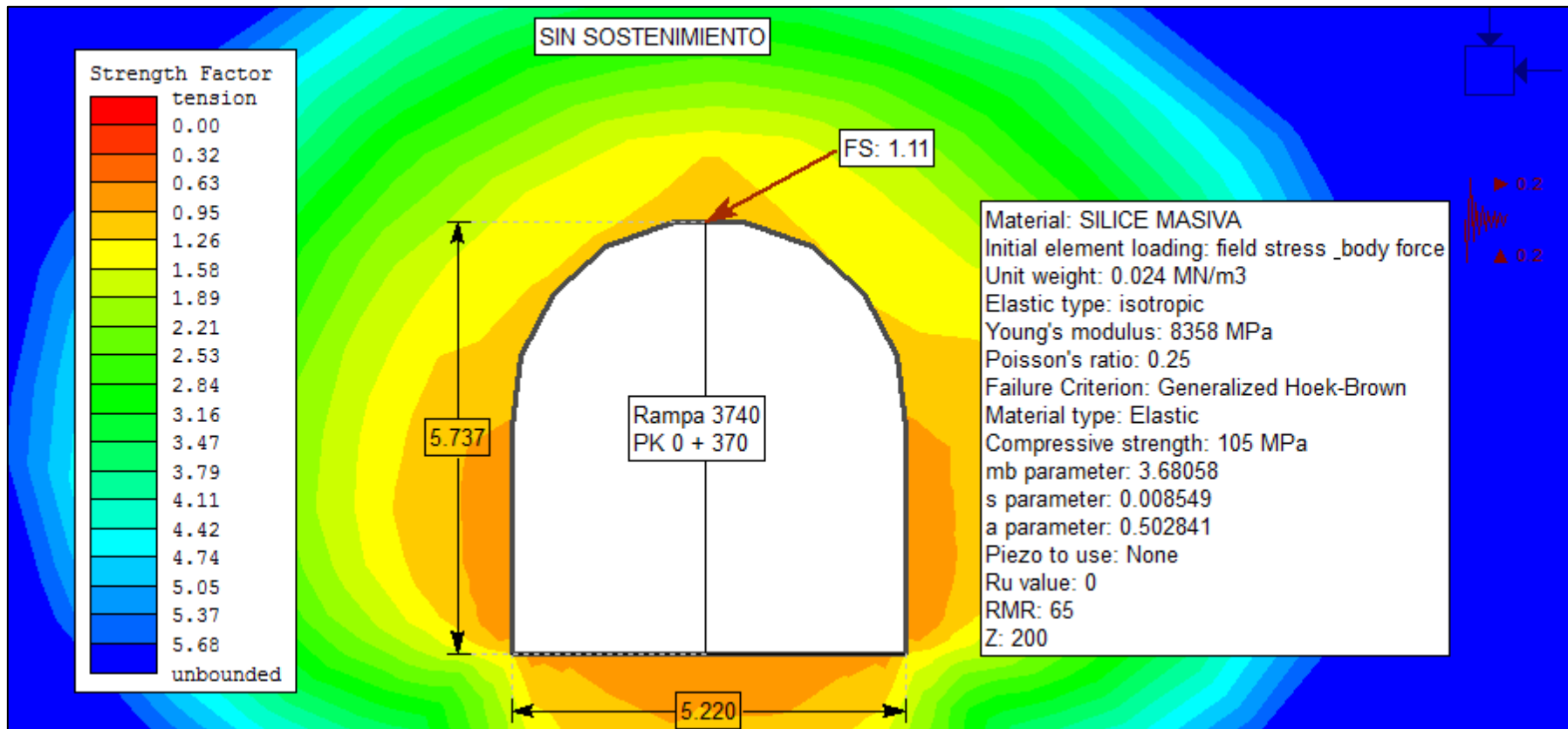


Figura 3.16 Modelamiento geomecánico sin sostenimiento en macizo rocoso de calidad buena tipo II

Con sostenimiento: Considerando la recomendación de sostenimiento; shotcrete 2 pulgadas reforzado con fibra sintética y pernos Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado, se obtiene un de F.S. mayor a 1.75. Esto indica que la instalación de sostenimiento aumenta la capacidad de resistencia del macizo y asegura la estabilidad de las excavaciones.

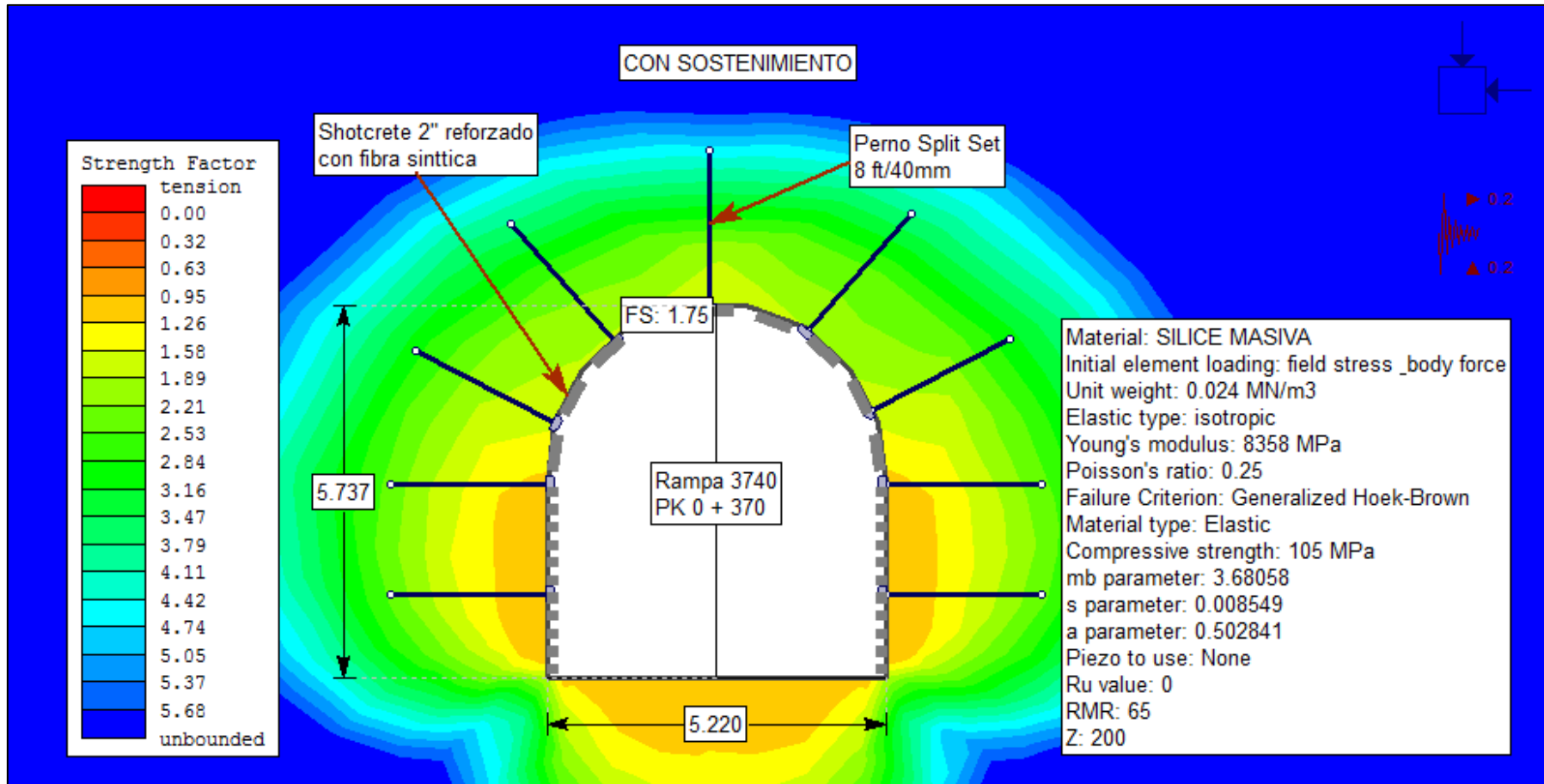


Figura 3.17 Modelamiento geomecánico con sostenimiento en macizo rocoso de calidad buena tipo II

3.11 CONTROL DE CALIDAD DEL SOSTENIMIENTO

El control de calidad al sostenimiento instalado en el túnel, se ha realizado según el Decreto Supremo N° 024–2016-EM y su modificatoria D.S. N° 023–2017–EM, realizándose controles en pernos y shotcrete mediante ensayos de Pull Test en pernos split set y helicoidales, ensayos de resistencias tempranas del shotcrete y ensayos de resistencia a la compresión simple del shotcrete, los cuales se encuentran dentro de los diseños establecidos.

3.11.1 Ensayos de Pull Test

Para cumplir con la frecuencia de ensayos control de calidad adecuado y verificar la capacidad de soporte y garantizar además su aplicación como elemento de fortificación en el túnel y de fijación a las mallas electrosoldadas instaladas utilizados en el proyecto Túnel de Exploración Chaquicocha - Fase II, se realizaron ensayos de tracción a pernos Split Set, helicoidales en el avance de la labor.

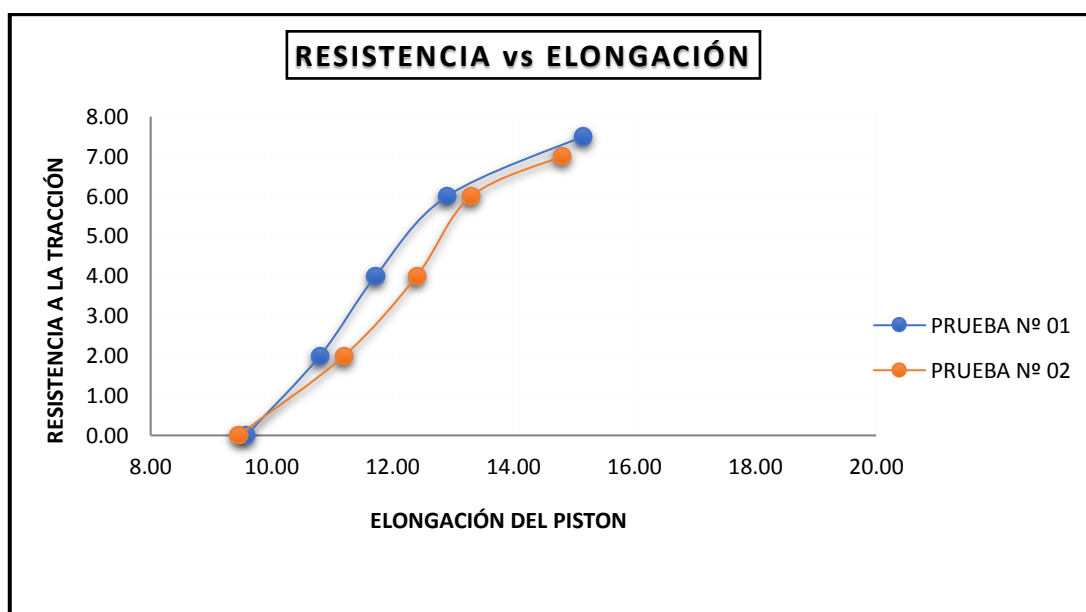
El sistema de anclaje con pernos está sujeto a las pruebas de ensayo, la prueba de carga se hace periódicamente en 20m de avance un promedio de 4 pernos instalados, tener en cuenta que el DS-023-2017 exige solo el 1% del total de pernos instalados: en caso de que fallara la prueba se coordina y se debe reemplazar el tipo de perno por uno que tenga mejor eficiencia en ese tipo de terreno.

Los ensayos se realizaron con máquina de arranque de pernos (ENERPAC) sus componentes son un gato hidráulico de 30 ton de capacidad y manómetro de presión calibrado por un laboratorio de pruebas, bomba hidráulica, pistón con arrancador de perno. Se usará el manómetro para medir la carga aplicada, el manómetro debe tener un rango que no exceda el doble de la presión máxima requerida durante las pruebas, a menos de que se apruebe por MYSRL, la gata debe ser capaz de aplicar la carga en menos de un minuto.

Se realizaron ensayos de Pull Test en pernos tipo Split Set y pernos Helicoidales en coordinación con supervisión Geotécnica de MYSRL, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.9 Resultados de ensayos de Pull Test en pernos Split Set de 8ft/40mm

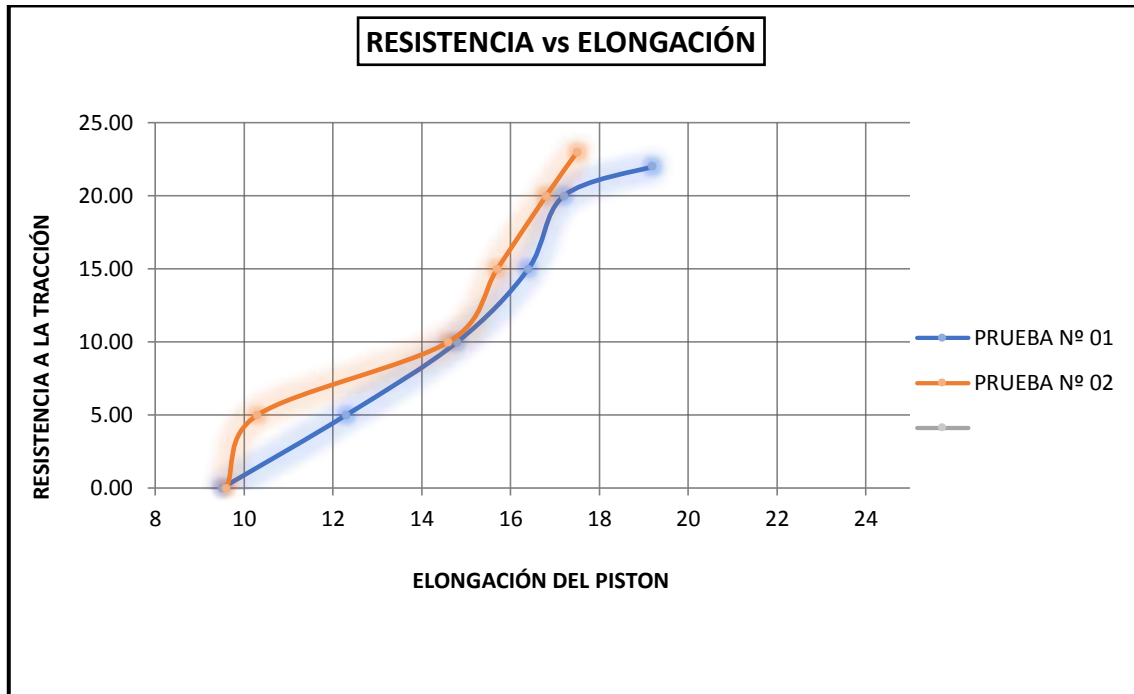
Fecha de Ensayo	N° Prueba	Labor	Progresiva	Hatial	Diámetro de la Broca (mm)	Quality Rock	Resultado (Tn)
12/10/2018	1	Rampa 3740	0+317.35	R	37	III-B	7.50
	2	Rampa 3740	0+316.50	L	37	III-B	7.00
19/10/2018	1	Rampa 3740	0+327.70	L	37	II	7.00
	2	Rampa 3740	0+326.90	R	37	II	9.00
21/10/2018	1	Rampa 3740	0+342.85	L	37	III-A	10.00
	2	Rampa 3740	0+343.10	R	37	III-A	8.00
14/11/2018	1	Rampa 3740	0+367.90	R	38	II	6.50
	2	Rampa 3740	0+365.50	L	38	II	10.00
14/11/2018	1	Rampa 3740	00+322.81	R	37	II	8.00
	2	Rampa 3740	00+325.00	L	37	II	7.00
25/11/2018	1	Rampa 3740	00+335.90	L	38	II	6.00
	2	Rampa 3740	00+340.30	R	37	II	8.00
02/12/2018	1	Cx 582 SW	00+8.50	R	37	II	10.00
	2	Cx 582 SW	00+2.60	R	37	II	8.00
	3	Cx 582 SW	00+6.30	L	37	II	7.00
	4	Cx 582 SW	00+1.80	L	37	II	8.00
10/12/2018	1	Rampa 3740	00+380.70	R	37	III-A	10.00
	2	Rampa 3740	00+393.50	L	37	III-A	7.00
	3	Rampa 3740	00+418.50	R	37	III-A	10.00
	4	Rampa 3740	00+420.40	L	37	III-A	11.00
15/12/2018	1	Rampa 3740	00+435.80	R	37	III-A	7.00
	2	Rampa 3740	00+440.60	L	37	III-A	6.00
	3	Rampa 3740	00+452.00	L	37	III-A	6.50



Gráfica 3.1 Curva de resistencia (TN) Vs Elongación (mm), durante las pruebas de arranque a 02 pernos Split Set.

Tabla 3.10 Resultados de ensayos de Pull Test en pernos helicoidales de 10ft/22mm

Fecha de Ensayo	N° Prueba	Labor	Progresiva	Hastial	Bits	RMR	Resultado (TN)
10/12/2018	1	Rampa 3740	00+394.50	R	36 mm	64	22
	2		00+394.00	L	36 mm	64	24



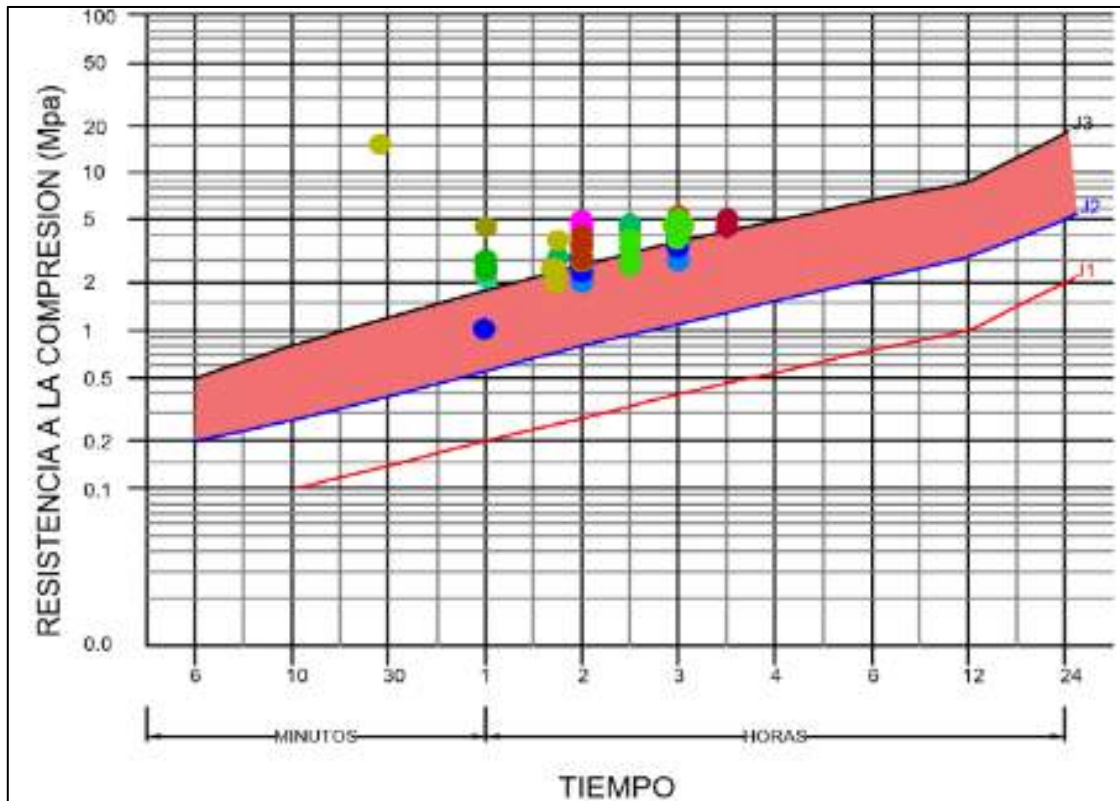
Gráfica 3.2 Curva de resistencia (TN) Vs Elongación (mm), durante las pruebas de arranque a 02 pernos helicoidales.

3.11.2 Control de Calidad del Shotcrete

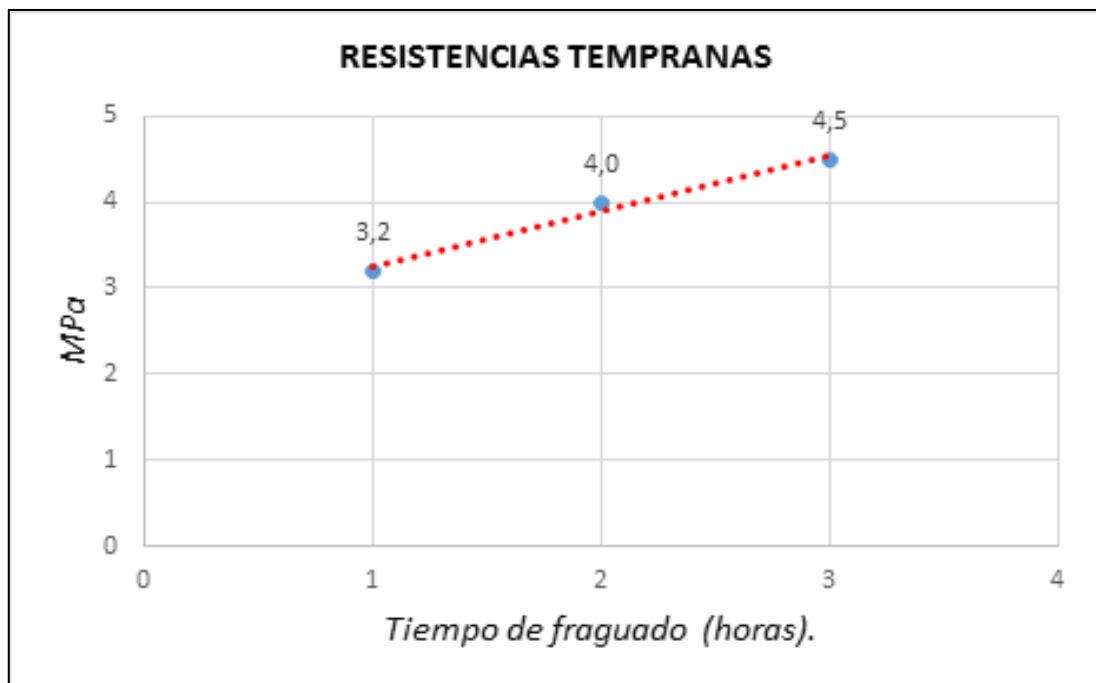
3.11.2.1 Ensayos de Resistencias Tempranas del Shotcrete

Se han realizado ensayos de resistencias tempranas del shotcrete para asegurar la continuidad de manera segura del ciclo de minado.

En la Grafica 6. Se muestra las resistencias tempranas obtenidas en la construcción del túnel, estas superan la curva J2 (resistencias tempranas mínimas para trabajos en tunelería) según establece la norma EN 14487-1 (32) e incluso llegando a la curva J3 la cual según norma se usa este rango para sostenimiento en macizos rocosos con condiciones adversas, cabe resaltar que no es el caso de nuestra labor, resultados favorables que aseguran la seguridad al continuar el ciclo de minado.



Gráfica 3.3 Resistencias tempranas obtenidas en cada lanzamiento de shotcrete

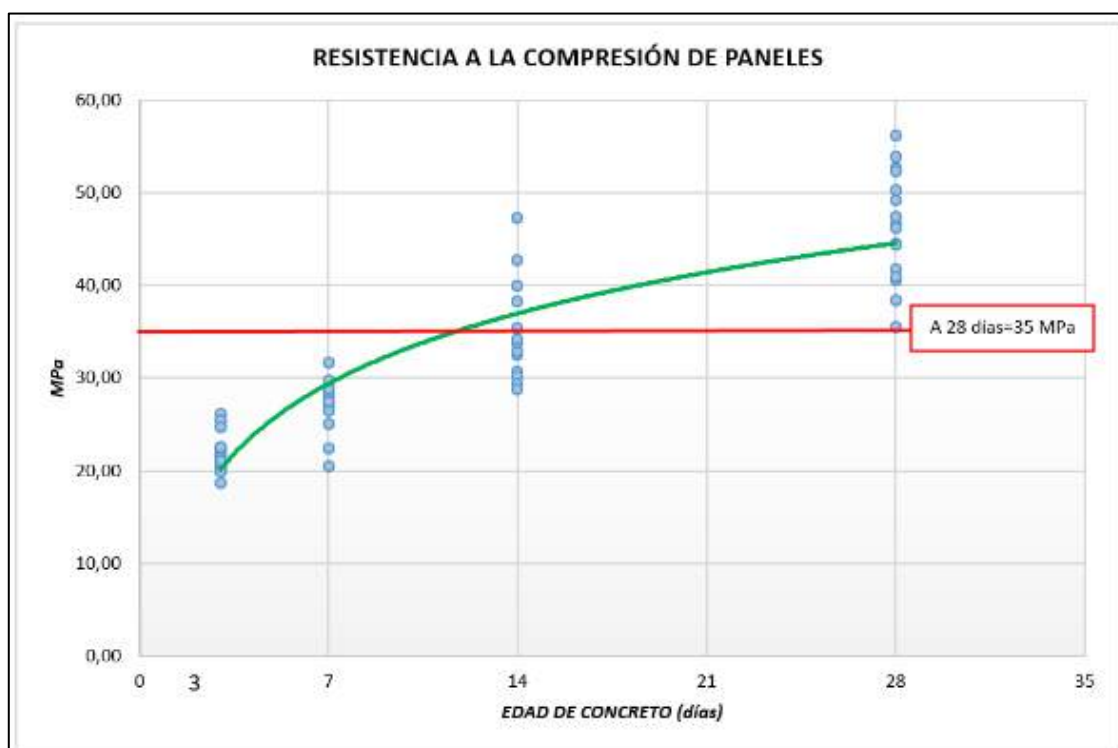


Gráfica 3.4 Ensayos de resistencias tempranas, tomadas en campo promediadas a 1, 2 y 3 horas; se observa la línea de tendencia de acuerdo con tiempo de fraguado.

3.11.2.2 Ensayos de Compresión Simple del Shotcrete

Los paneles se muestrean cerca de la labor que se realiza el lanzamiento de shotcrete, se muestrea un panel de prueba por cada lanzamiento de shotcrete, después de 12 horas deben transportarse en sus molduras de madera y se debe tener cuidado de no quebrar o dañar la muestra durante su transporte.

Hay que precisar que los paneles antes de ser ensayados deben de pasar por un proceso de curado 24 horas después de ser lanzado, el cual consiste sumergir completamente los paneles en una poza de agua a temperatura y pH determinado. Después del período de curado correspondiente, las muestras serán extraídas de los paneles utilizando cortadora o corona de diamante. Los ensayos de ruptura se realizan a los 3, 7, 14 y 28 días de edad del concreto. Las pruebas de resistencia final se llevan a cabo a los 28 días, en conformidad con la norma EN-14488-1. El diseño utilizado para el proyecto es de 35 MPa como resistencia final a la compresión



Gráfica 3.5 Curva de resistencias a la compresión simple de paneles comprobando la edad necesaria para cumplir el 100% de la resistencia final (28 días)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE DISCONTINUIDADES

Para analizar a detalle la distribución de discontinuidades respecto al eje de la labor se ha dividido en cuatro tramos y los resultados son como sigue:

Tramo N° 01: PK 0 + 290 a 0 + 340. Encontramos un sistema estructural principal y dos sets secundarios de discontinuidades sub paralelas entre sí. Los cuales se encuentran sub paralelas al avance de la labor. Considerado como condición desfavorable a muy desfavorable, generando inestabilidad especialmente en la corona de la labor.

Tramo N° 02: PK 0 + 340 a 0 + 380. Encontramos dos sistemas principales y dos sistemas secundarios de discontinuidades. Estos sistemas de discontinuidades cortan de forma diagonal y perpendicular al avance de la Rampa 3740, considerado como condición media a desfavorable generando principalmente inestabilidad en la corona de la labor.

Tramo N° 03: PK 0 + 380 a 0 + 420. Se definen dos sistemas estructurales principales y dos secundarios de discontinuidades. Así tenemos que el sistema S1 se encuentra paralelo al eje de la labor, el sistema S2 y S3 cortando en forma diagonal al avance con dirección de buzamiento opuestos entre sí, generando la formación de cuñas en la corona de la labor y el sistema S4 con orientación perpendicular al eje del túnel. Estas condiciones son consideradas desfavorables para la estabilidad de la labor.

Tramo N° 04: PK 0 + 420 a 0 + 460. Encontramos dos sistemas principales de discontinuidades y un sistema secundario. Los sistemas principales cortan de manera perpendicular y el sistema secundario lo hace de manera diagonal al eje de la labor, considerándose como condición de estabilidad regular a favorable.

4.2 DEFINICIÓN DEL SOSTENIMIENTO

La evaluación geomecánica del frente, mediante el levantamiento geotécnico del frente y su caracterización geomecánica, constituye la base fundamental para determinar la

calidad del macizo rocoso utilizando las clasificaciones geomecánicas de RMR Y GSI vigentes en MYSRL.

Los resultados indican que el macizo rocoso presente a lo largo del eje del túnel varía, entre calidad Buena Tipo II (RMR = 61 - 80), Regular Tipo III-A (51 - 60) y Regular Tipo III-B (RMR = 41 - 50). Para cada una de estas le corresponde el siguiente sostenimiento:

Regular Tipo II: Shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado, distribución cuadrada.

Regular Tipo III-A: shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado, distribución cuadrada.

Regular Tipo III-B: Shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y perno Split Set de 8 pies de largo a 1.2m de espaciado, distribución cuadrada.

4.3 ESTABILIDAD DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS

Para cada tipo de roca presente en la labor corresponde analizar la estabilidad de la excavación tanto en condiciones naturales y con la instalación del sostenimiento. El análisis se realiza mediante el software geomecánico Phase2 V 8.0. Obteniéndose lo siguiente:

Regular Tipo III-B: Sin sostenimiento, se tiene un factor de seguridad F.S.: 0.95. Esto indica que la capacidad de soporte del macizo es menor a las fuerzas que actúan sobre la excavación por lo que requiere ser sostenida. Mientras que, instalando el sostenimiento recomendado para este tipo de roca; shotcrete 2 pulgadas y Pernos Split Set de 8 pies de longitud a 1.2m de espaciado, se obtiene un factor de seguridad F.S.: 1.58; lo cual indica que bajo estas condiciones de sostenimiento la labor es estable y segura.

Regular Tipo III-A: Sin sostenimiento, se tiene un factor de seguridad F.S. 1.05. Este valor indica que el sistema se encuentra en equilibrio límite y requiere sostenimiento al tratarse de una labor permanente. Considerando la recomendación de sostenimiento; shotcrete 2 pulgadas con pernos Split Set de 8 pies de longitud a 1.5m de espaciado, se obtiene un F.S.: 1.65. Este resultado indica que la instalación del sostenimiento

aumenta la capacidad de resistencia del macizo generando así condiciones estables en la labor.

Buena Tipo II: Sin sostenimiento, se tiene un factor de seguridad F.S.: 1.11. Esto indica que la capacidad de resistencia del macizo es ligeramente mayor a las fuerzas que actúan sobre la excavación; por lo tanto, no genera condiciones seguras de estabilidad para una labor permanente. Considerando el sostenimiento; shotcrete 2 pulgadas y pernos Split Set de 8 pies de longitud a 1.7m de espaciado, se obtiene un factor de seguridad F.S: 1.75. Esto indica que la instalación de sostenimiento aumenta la capacidad de resistencia del macizo y asegura la estabilidad de las excavaciones.

4.4 CONTROL DE CALIDAD

Los controles geotécnicos, controles de calidad a los elementos de sostenimiento instalados se realizaron cumpliendo las normas establecidas con los que se garantiza su calidad y operatividad. El diseño del concreto lanzado ha sido elaborado, para obtener una resistencia final a la compresión uniaxial de 35 MPa a los 28 días, los ensayos realizados se encuentran dentro de los parámetros establecidos. Del mismo modo se deja en evidencia que la capacidad soportante de los pernos instalados cumple con los parámetros establecidos.

4.5 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

En el estudio, tomando los resultados obtenidos del análisis de estabilidad en las excavaciones y ensayos de control de calidad del sostenimiento que muestran un comportamiento estable del Túnel de Exploración Chaquicocha - Fase II, se demostró que el diseño de sostenimiento se define en función a la calidad del macizo rocoso determinado mediante las clasificaciones geomecánicas RMR y GSI MYSRL.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El macizo rocoso presente a lo largo del eje del túnel varía entre calidad buena tipo II, regular tipo III-A y regular tipo III-B; según la clasificación RMR 89 y GSI vigentes en MYSRL. Para las cuales se ha definido el siguiente sostenimiento: Para buena tipo II; shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y pernos Split Set de 8 pies de largo a 1.7m de espaciado, distribución cuadrada. Para regular tipo III-A; shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y pernos Split Set de 8 pies de largo a 1.5m de espaciado, distribución cuadrada y para regular tipo III-B; shotcrete 2 pulg. reforzado con fibra sintética y pernos Split Set 8 pies de largo a 1.2m de espaciado, distribución cuadrada.

Los estudios, ensayos y análisis realizados mediante software Phase2 v 8.0, nos muestran un comportamiento estable del túnel con el sostenimiento recomendado, siendo el factor de seguridad mayor a 1.50, con los que se garantizan su operatividad durante el tiempo de vida útil.

El control de calidad del sostenimiento instalado en el túnel se ha realizado mediante ensayos de Pull Test en pernos Split Set, dando como resultado promedio de resistencia a la tracción 8 TN y ensayos de compresión simple de shotcrete, obteniendo como resultado una resistencia final mayor a los 35 Mpa en 28 días. Estos resultados aseguran el rendimiento de los elementos utilizados en el sostenimiento.

Si bien, los estándares nos entregan una buena referencia de sostenimiento, deben ser usadas sólo como guía, puesto que el diseño de sostenimiento siempre debe estar sujeto a las condiciones y evaluaciones locales del macizo rocoso a medida que se desarrollan las labores. El sostenimiento en intersecciones siempre será más pesado debido a cuñas en la corona y mayor área expuesta a esfuerzos y deterioro de sostenimiento.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar mediciones de convergencia en diferentes puntos, para medir las deformaciones que adquiere el túnel producto de los esfuerzos a los que está sometido.

Se recomienda realizar un diseño de mezcla 350 kg/cm² para alcanzar de manera óptima una resistencia final del shotcrete de 35 Mpa a los 28 días.

Se recomienda realizar voladuras controladas en el frente de avance, para evitar daño secundario al macizo rocoso y controlar la sobre excavación.

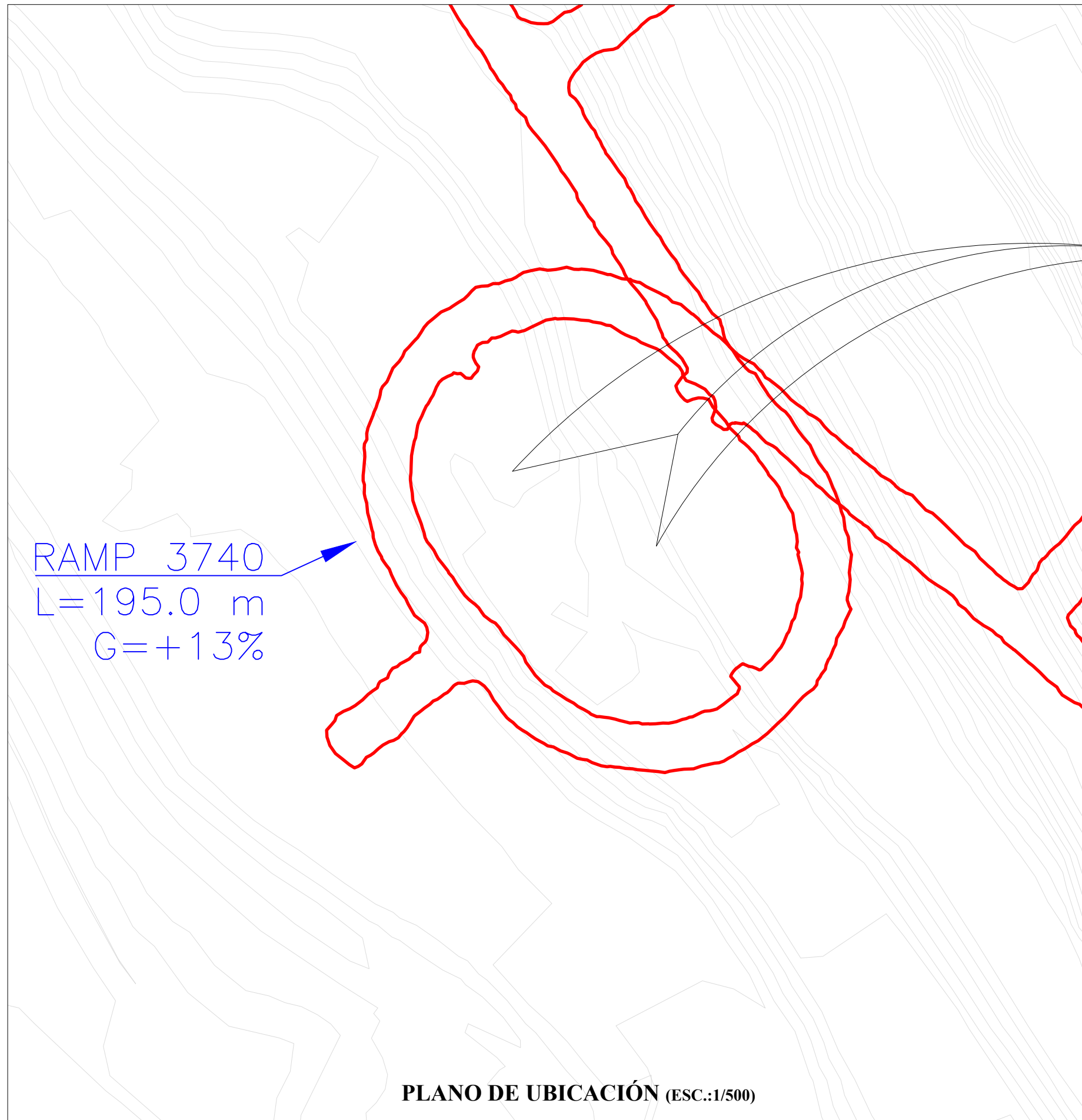
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A. 2008. Caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, Mina Chuquicamata. Tesis Ing. de Minas, Santiago de Chile, Chile, Universidad de Chile. 91 p.
- Basurto, J. 2014. Validación del muestreo de blastholes por canales en zonas de mineralización de sulfuros, Proyecto Yanacocha Verde – Cajamarca: informe de suficiencia. Tesis Ing. Lima, Perú, UNI. 82 p.
- Bieniawski, Z. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. New York, Estados Unidos. 251 p.
- Gavilanes, H; Andrade, B. 2004. Introducción a la ingeniería de túneles: caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. 3 ed. Quito, Ecuador, AIME. 349 p.
- González de Vallejo, L. 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, España, PEARSON EDUCACIÓN. 744 p.
- Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. Canada. ISRM News Journal.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics, Portugal) 1981. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: international journal of rock mechanics, mining science & geomechanics abstracts. Lisboa, Portugal. v. 18, 110 p.
- Minera Yanacocha, Perú. 2017. Expediente Técnico del Proyecto Túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II: Alcance de Trabajo. Cajamarca, Perú. 47 p.
- OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Perú) 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Consultado el 20 nov. 2019. Disponible en <https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/mineria/publicaciones>

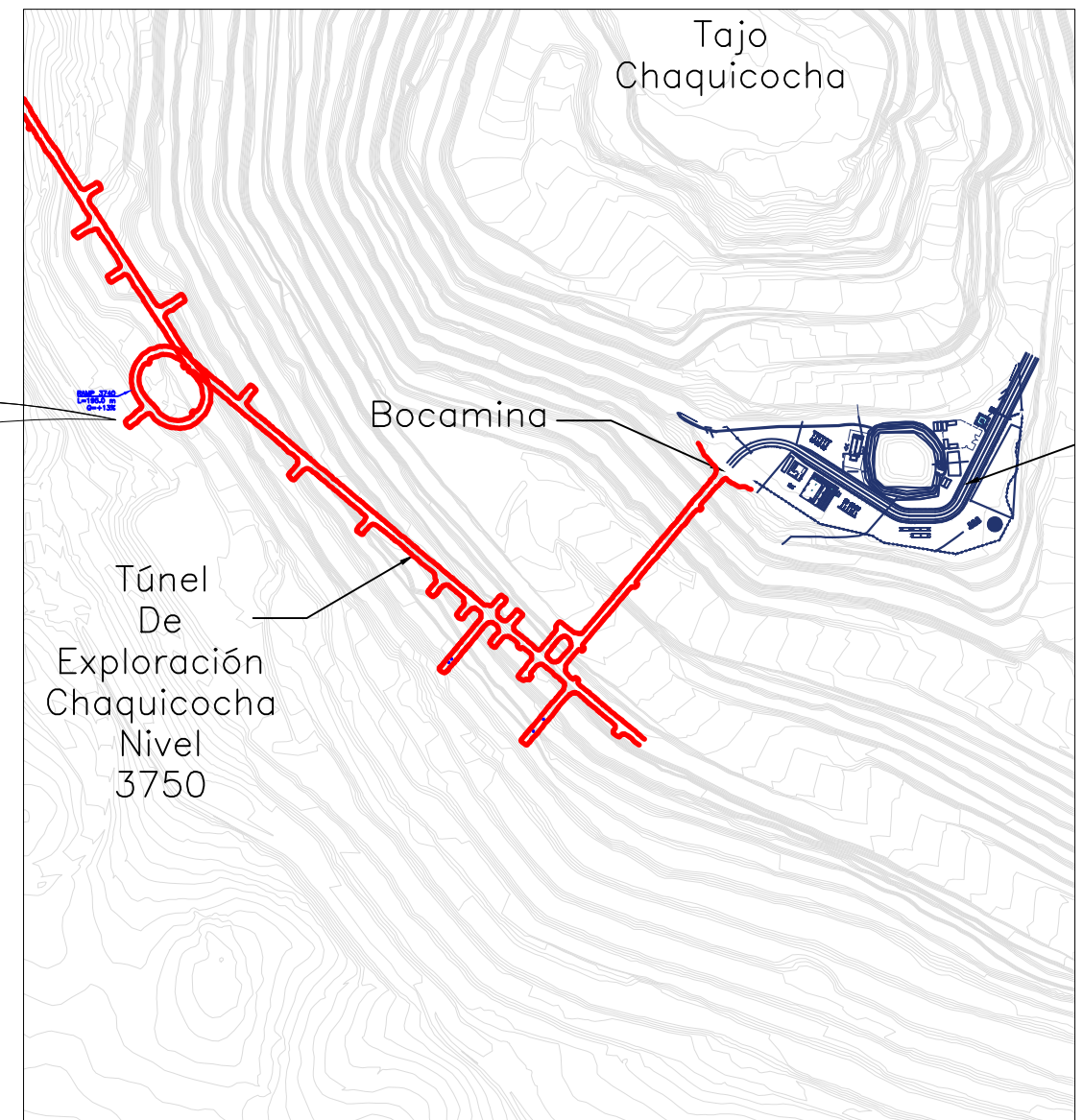
- Rayo, H. 2007. Sectorización Geotécnica del Túnel de Drenaje Etapa 2, Expansión Norte de Mina sur, División Codelco Norte. Tesis Ing. Santiago de Chile, Chile, Universidad de Chile. 91 p.
- Rocsience. 2002. Geological Strength Index GSI estimation based on geological descriptions. Toronto, Canadá.
- Salcedo, D. 1988. Macizos Rocosos: caracterización, resistencia al corte y mecanismos de rotura. Conferencia 25avo Aniversario Soc. Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones, Caracas, Venezuela.
- Saldaña, A. 2013. Productividad en el ciclo de carguío y acarreo en el tajo Chaquicocha bajo clima severo - Minera Yanacocha. Tesis Ing. Lima, Perú, UNI. 246 p.
- Sheorey, P. 1994. Teoría de tensiones in situ en rocas isotrópicas y transversalmente isotrópicas. Revista internacional de mecánica de rocas y ciencia en minería y geomecánica abstracta (En línea, sitio web). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906294923124?via%3Dihub>
- Vilela, W. 2014. Análisis de factibilidad para el uso de Anfo pesado a base de emulsión gasificable en Minera Yanacocha. Tesis Lic. Cajamarca, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 83 p.
- Zamora, P. 2005. Geología del depósito de Chaquicocha Sur (en línea, sitio web). Consultado el 20 nov. 2019. Disponible en <https://es.scribd.com/document/349772564/Chaquicocha-pdf>

ANEXOS

- Anexo N° 1.** PU-01: Plano de Ubicación y Localización del Túnel de Exploración Chaquicocha – Fase II.
- Anexo N° 2.** PR-02: Plano Planta - Rampa 3740
- Anexo N° 3.** PPR-03: Plano Perfil - Rampa 3740
- Anexo N° 4.** PZG-04: Plano de Zonificación Geomecánica - Rampa 3740
- Anexo N° 5.** PG-05: Plano Geológico – Nv. 3750
- Anexo N° 6.** Formato de mapeo geomecanico para sistema de clasificación RMR adaptado por MYSRL
- Anexo N° 7.** Tabla GSI adaptada GSI MYSRL (izquierda) y recomendación de sostenimiento según RMR89 adaptada por MYSRL (derecha)
- Anexo N° 8.** Simbología cromática por calidad de roca (Osinermin, 2017)
- Anexo N° 9.** Ficha Técnica. Perno de Anclaje Split Set.
- Anexo N° 10.** Ficha Técnica. Perno Helicoidal.
- Anexo N° 11.** Ficha Técnica y Diseño de Shotcrete Vía Húmeda – Proyecto Chaquicocha UG - MYSRL.
- Anexo N° 12.** Autorización para el uso de información de Minera Yanacocha.
- Anexo N° 13.** Certificado de Originalidad - Software antiplagio Urkund.



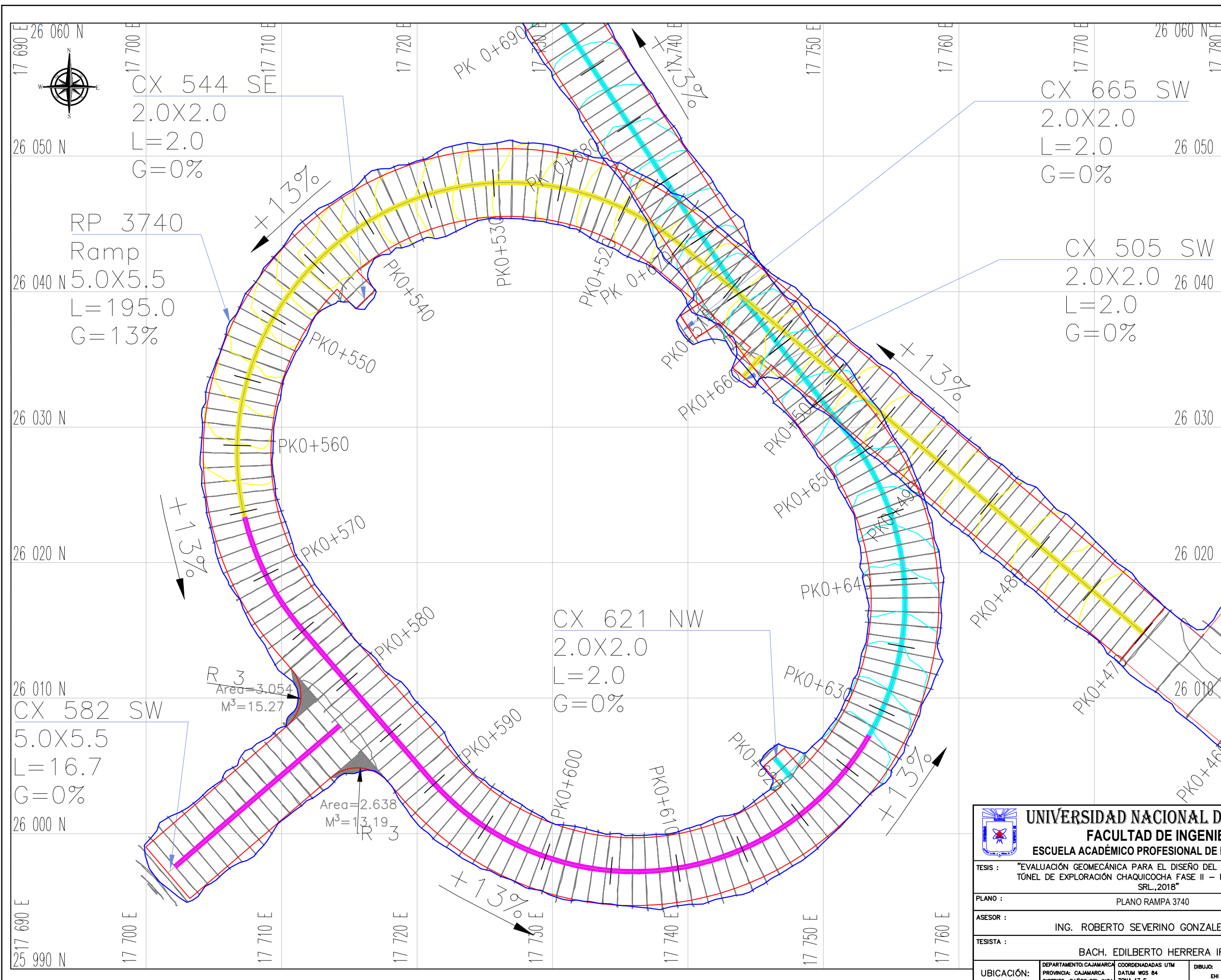
PLANO DE UBICACIÓN (ESC.:1/500)



ESQUEMA DE LOCALIZACION (ESC.:1/5000)

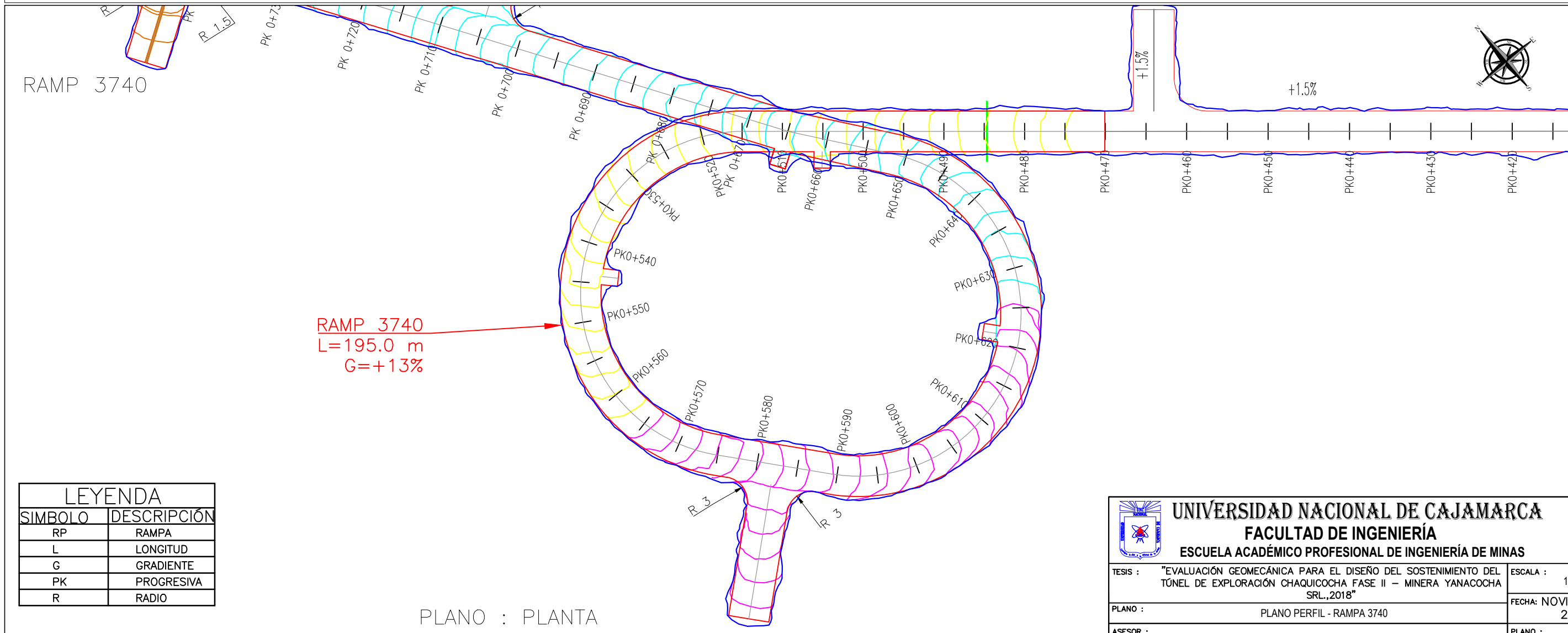
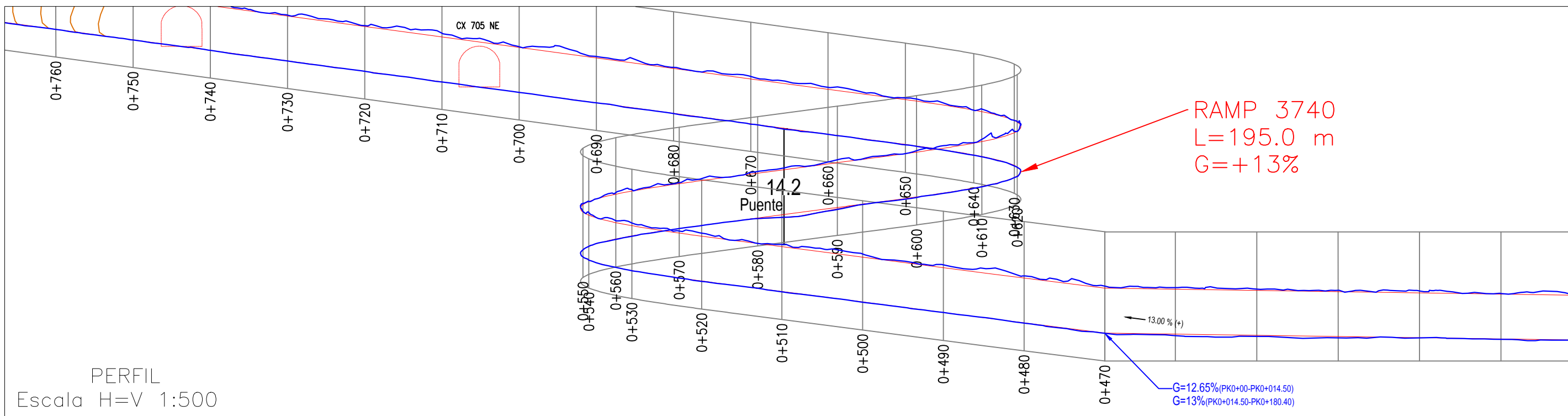
LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
RP	RAMPA
L	LONGITUD
G	GRADIENTE
	CURVAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS				
TESIS : "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II – MINERA YANACOCHA SRL.,2018"		ESCALA : 1/500		
PLANO : PLANO LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN		FECHA: NOVIEMBRE 2019		
ASESOR : ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA		PLANO :		
TESISISTA : BACH. EDILBERTO HERRERA IRIGOIN		PU-01		
UBICACIÓN:	DEPARTAMENTO: CAJAMARCA PROVINCIA: CAJAMARCA DISTRITO: BAÑOS DEL INCA	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84 ZONA 17 S	DIBUJO: EHI	TIPO DE OBRA: OBRA NUEVA



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
RP	RAMPA
L	LONGITUD
G	GRADIENTE
PK	PROGRESIVA
CX	CRUCERO
R	RADIO

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS				
TESIS : "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II - MINERA YANACOCHA SRL.,2018"		ESCALA : 1/500		
PLANO : PLANO RAMPA 3740		FECHA: NOVIEMBRE 2019		
ASESOR : ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA		PLANO :		
TESISTA : BACH. EDILBERTO HERRERA IRIGOIN		PR-02		
UBICACIÓN:	DEPARTAMENTO: CAJAMARCA PROVINCIA: CAJAMARCA DISTRITO: BAROS DEL INCA	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84 ZONA 17 S	DIBUJO: EHI	TIPO DE OBRA: OBRA NUEVA



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
RP	RAMPA
L	LONGITUD
G	GRADIENTE
PK	PROGRESIVA
R	RADIO

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS : "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II - MINERA YANACOCHA SRL., 2018"		ESCALA : 1/500
PLANO : PLANO PERFIL - RAMPA 3740		FECHA: NOVIEMBRE 2019
ASESOR : ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA		PLANO :
TESISTA : BACH. EDILBERTO HERRERA IRIGOIN		PPR-03
UBICACIÓN:	DEPARTAMENTO: CAJAMARCA PROVINCIA: CAJAMARCA DISTRITO: BAÑOS DEL INCA	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84 ZONA 17 S
DIBUJO: EHI	TIPO DE OBRA: OBRA NUEVA	

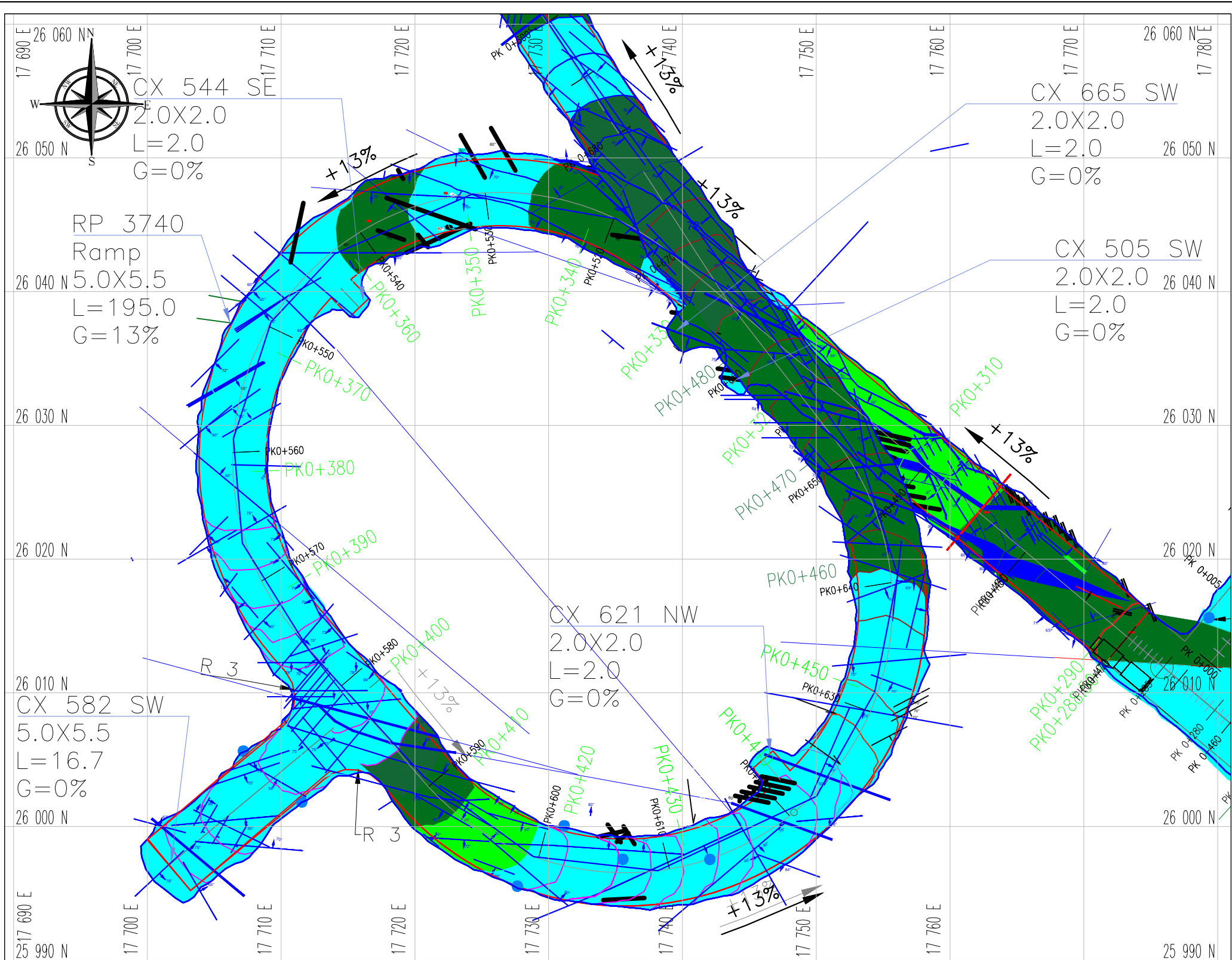


TABLA GEOMECANICA PARA CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO - CHAQUICOCHA UG

TABLA GEOMECANICA SEGUN GSI		CONDICION SUPERFICIAL (RESISTENCIA)	
II	SH 2' (CF) (Fc 350) + PERNO 8' SISTEMATICO 1.7 A 2 M	MUY BUENA (EXTREMADAMENTE RESISTENTE FRESCA)	MUY BUENA (EXTREMADAMENTE RESISTENTE FRESCA)
III-A	SH 2' (CF) (Fc 350) + PERNO 8' SISTEMATICO 1.5 A 1.7 M	BUENA (MUY RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA)	BUENA (MUY RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA)
III-B	SH 2' (CF) (Fc 350) + PERNO 8' SISTEMATICO 1.2 X 1.5 M	REGULAR (RESISTENTE LEVEMENTE ALTERADA)	REGULAR (RESISTENTE LEVEMENTE ALTERADA)
IV-A	SH 2' (CF) (Fc 350) + MALLA + PERNO 8' SISTEMATICO 1.2 A 1.5 M + SHOT SOBRE MALLA 1" (SF)	POBRE (MODERADAMENTE RESIST. MODERADAMENTE ALTER.)	POBRE (MODERADAMENTE RESIST. MODERADAMENTE ALTER.)
IV-B	SH 2' (CF) (Fc 350) + MALLA + PERNO 8' SISTEMATICO 1.0 A 1.2 M + SHOT SOBRE MALLA 2" (SF)	MUY POBRE (BLANDA, MUY ALTERADA)	MUY POBRE (BLANDA, MUY ALTERADA)
V	SH 2' (CF) (Fc 350) + CIMBRAS H6 ESPACIADA DE 0.80 A 1.0 M	MUY MALA (MUY BLANDA, MUY ALTERADA)	MUY MALA (MUY BLANDA, MUY ALTERADA)

INTERSECCIONES > 9 m.	
(B)	PERNO REBAR 10' SIST. 1.7 X 1.5 M
(C)	PERNO SIST REBAR 10' SIST. 1.5 X 1.5 M
(D)	PERNO SIST REBAR 10' SIST. 1.2 X 1.5 M
(E)	PERNO SIST REBAR 10' SIST. 1.0 X 1.2 M

ESTRUCTURA	
	LEVEMENTE FRACTURADA. TRES A MENOS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (ROD 75 - 90) (2 A 6 FRACT. POR METRO)
	MODERADAMENTE FRACTURADA. MUY BIEN TRABADA. NO DISTURBADA. BLOQUES CUBICOS FORMADOS POR TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES ORTOGONALES. (ROD 50 - 75) (6 A 12 FRACT. POR METRO)
	MUY FRACTURADA. MODERADAMENTE TRABADA. PARCIALMENTE DISTURBADA. BLOQUES ANGULOSOS FORMADOS POR CUATRO O MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES. (ROD 25 - 50) (12 A 20 FRACT. POR METRO)
	INTENSAMENTE FRACTURADA. FLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO. CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO BLOQUES ANGULOSOS O IRREGULARES. (ROD 0 - 25) (MAS DE 20 FRACT. POR METRO)
	TRITURADA O BRECHADA. LIGERAMENTE TRABADA. MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DISGREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS. (SIN ROD)

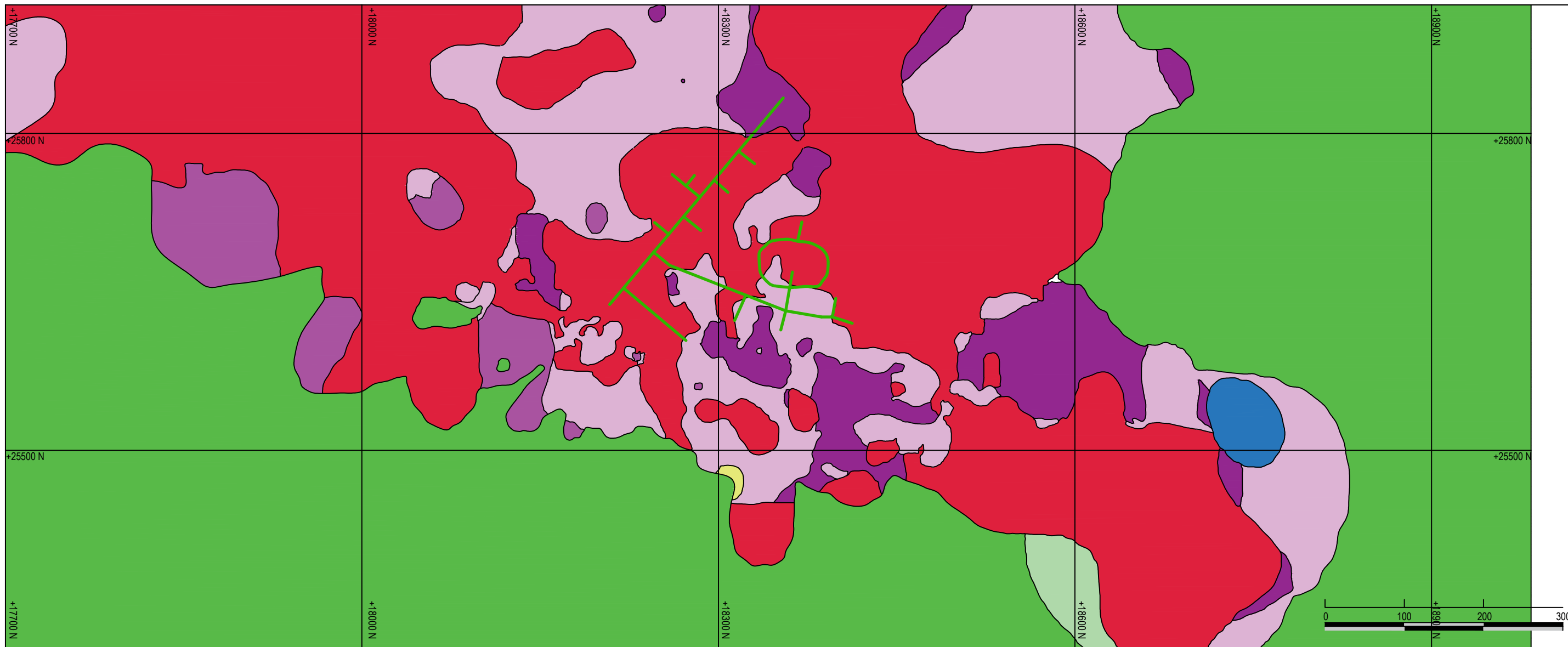
TRABADA: Cuando existen fracturas que forman cuñas que se auto-sostienen entre si.
 ZONA A: No considerar la franja verde.
 ZONA B: No considerar la franja amarilla.






RECOMENDACIÓN DE SOSTENIMIENTO POR TIPO DE ROCA Y TIPO DE LABOR			
RMR	CALIDAD	TIPO	LABORES DE AVANCE
61 - 80	BUENA	II	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintetica con perno sistematico de 1.7 m. a 2.0 m de 8 pies de largo. En intersecciones usar Pernos de 10 pies de forma sistematica espaciado de 1.8 x 1.8 m en corona.
51 - 60	REGULAR "A"	III-A	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintetica con perno sistematico de 1.5 m. a 1.7 m de 8 pies de largo. En intersecciones usar Pernos Revar de 10 pies de forma sistematica espaciada de 1.8 x 1.8 m en corona.
41 - 50	REGULAR "B"	III-B	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintetica con perno sistematico de 1.2 m. a 1.5 m de 8 pies de largo. En intersecciones usar Pernos Revar de 10 pies de forma sistematica espaciada de 1.5 x 1.5 m en corona.
31 - 40	MALA "A"	IV-A	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar Shotcrete 2 pulg con fibra con malla + perno sistematico de 1.2 m. a 1.5 m de 8 pies de largo y shotcrete sobre malla 1 pulg de espesor sin fibra sintetica. En intersecciones usar Pernos Revar de 10 pies de forma sistematica espaciada de 1.2x 1.2 m en corona.
21 - 30	MALA "B"	IV-B	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: Colocar Shotcrete 2 pulg con fibra con malla + perno sistematico de 1.0 m. a 1.2 m de 8 pies de largo y shotcrete sobre malla 2 pulg de espesor sin fibra sintetica.
0 - 20	MUY MALA "A"	V	En labores mayores o iguales a 5.0 m x 5.0 m: cimbras H6 galvanizadas espaciadas de 0.8 m a 1.0 m con placas acanaladas topeados con bolsacretos. Previamente colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintetica como pre soporte

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS : "EVALUACIÓN GEOMECANICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II - MINERA YANACOCCHA SRL., 2018"	ESCALA : 1/500
PLANO : PLANO DE ZONIFICACIÓN GEOMECANICA - RAMPA 3740	FECHA : NOVIEMBRE 2019
ASESOR : ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA	PLANO :
TESIS TA : BACH. EDILBERTO HERRERA IRIGOIN	PZG-04


UBICACIÓN : DEPARTAMENTO: CAJAMARCA PROVINCIA: CAJAMARCA DISTRITO: BAÑOS DEL INCA	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84 ZONA 17 S	DIBUJO: E#1	TIPO DE OBRA: OBRA NUEVA
---	--	-------------	--------------------------



LEYENDA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	SILICE VUGGY
	SILICE MASIVA
	PROPILITIC
	SILICE CLAY 3
	SILICE GRANULAR

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS : "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II – MINERA YANACOCHA SRL.,2018"		ESCALA : 1/50
PLANO : PLANO GEOLÓGICO - Nv. 3750		FECHA: NOVIEMBRE 2019
ASESOR : ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA		PLANO :
TESISTA : BACH. EDILBERTO HERRERA IRIGOIN		PG-05
UBICACIÓN:	DEPARTAMENTO: CAJAMARCA PROVINCIA: CAJAMARCA DISTRITO: BAROS DEL INCA	COORDENADAS UTM DATUM WGS 84 ZONA 17 S
DIBUJO: EHI	TIPO DE OBRA: OBRA NUEVA	

Anexo N° 6. Formato de mapeo geomecanico para sistema de clasificación RMR 89 de Bieniaswki modificado por MYSRL.



MAPEO GEOMECANICO

LUGAR: Nivel 3750

LABOR: _____

SECCION: _____

HOJA Nro: _____

PCR: _____

FECHA: _____

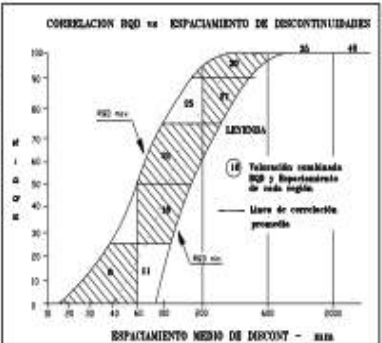
N° ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA				TRAMO	
	RUMBO		BUZAMIENTO		DESDE	HASTA

NOTA NUM	TIPO ESTRUCC	ORIENTACION		ESPRAC. (cm)	REGIST. (m)	APERT. (mm)	RUGOS	RELL	AGUA	WALL STRENGTH
		DIP	DDP							
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										

PARAMETRO	RANGO DE VALORES					VALORACION																																
	1	2	3	4	5	R.D	R.I	FRENTE																														
R. COMPRESION UNIAIAL (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	<25(2) +5(1) = 1																																	
RQD %	90-100	75-90	50-75	25-50	<25																																	
ESPACIAMIENTO (m)	<2	0.8-2	0.2-0.8	0.06-0.2	<0.06																																	
CONDICION DE JUNTAS	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>RESISTENCIA</td> <td>>1m long</td> <td>0.1-3 m Long</td> <td>0-10m</td> <td>10-20 m</td> <td>> 20 m</td> </tr> <tr> <td>APERTURA</td> <td>Cerrada</td> <td><0.1mm apart.</td> <td>0.1-1.0mm (4)</td> <td>1 - 5 mm</td> <td>> 5 mm</td> </tr> <tr> <td>RUGOSIDAD</td> <td>Muy rugosa</td> <td>Rugosa</td> <td>Lig. rugosa</td> <td>Lisa</td> <td>Espejo de falla</td> </tr> <tr> <td>RELLENDO</td> <td>Limpia</td> <td>Duro < 5mm</td> <td>Duro > 5mm</td> <td>Suave < 5 mm</td> <td>Suave > 5 mm</td> </tr> <tr> <td>INTemperiza</td> <td>Sana</td> <td>Lig. Intemper.</td> <td>Med. Intemper.</td> <td>Muy Intemper.</td> <td>Descompuesta</td> </tr> </table>					RESISTENCIA	>1m long	0.1-3 m Long	0-10m	10-20 m	> 20 m	APERTURA	Cerrada	<0.1mm apart.	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm	> 5 mm	RUGOSIDAD	Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Lisa	Espejo de falla	RELLENDO	Limpia	Duro < 5mm	Duro > 5mm	Suave < 5 mm	Suave > 5 mm	INTemperiza	Sana	Lig. Intemper.	Med. Intemper.	Muy Intemper.	Descompuesta			
RESISTENCIA	>1m long	0.1-3 m Long	0-10m	10-20 m	> 20 m																																	
APERTURA	Cerrada	<0.1mm apart.	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm	> 5 mm																																	
RUGOSIDAD	Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Lisa	Espejo de falla																																	
RELLENDO	Limpia	Duro < 5mm	Duro > 5mm	Suave < 5 mm	Suave > 5 mm																																	
INTemperiza	Sana	Lig. Intemper.	Med. Intemper.	Muy Intemper.	Descompuesta																																	
AGUA SUBTERRANEA	Seco	Humedo	Mojado	Gotoso	Fuiga																																	
VALOR RMR BASICO																																						
DIRECCION Y BUZAMIENTO TUNELES	Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfav.																																	
	0	-2	-5	-10	-12																																	
VALOR RMR CORREGIDO																																						
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0																																	
DESCRIPCION	I - MUY BUENA	II - BUENA	III - REGULAR	IV - MALA	V - MUY MALA																																	

GRADO	ESCALA "R" ISRM	UCS (Mpa)
R1	ROCA MUY BLANDA SE DESMORONA BAJO GOLPES FIRME CON LA PUNTA DEL MARTILLO DE GEOLOGO. PUEDE SER DESCASCARADO POR UNA NAVAJA.	1 - 5
R2	ROCA BLANDA PUEDE SER DESCASCARADO POR UNA NAVAJA CON DIFICULTAD. INDENTACIONES SUPERFICIALES SE HACEN POR UN GOLPE FIRME CON LA PUNTA DEL MARTILLO DE GEOLOGO.	5 - 25
R3	ROCA MOD. DURA NO PUEDE SER RAYADO CON UNA NAVAJA. EL ESPECIMEN PUEDE SER FRACTURADO CON UN SIMPLE GOLPE DEL MARTILLO DE GEOLOGO.	25 - 50
R4	ROCA DURA EL ESPECIMEN REQUIERE MAS DE UN GOLPE DEL MARTILLO DE GEOLOGO PARA FRACTURARSE.	50 - 100
R5	ROCA MUY DURA EL ESPECIMEN REQUIERE DE MUCHOS GOLPES DEL MARTILLO DE GEOLOGO PARA FRACTURARSE.	100 - 250
R6	ROCA EXTRA DURA SOLO SE ASTILLA BAJO GOLPES REPETIDOS DEL MARTILLO DEL GEOLOGO.	> 250

CORRELACION RQD vs ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES



ESPACIAMIENTO MEDIO DE DISCONT. - mm

Abrev. Relleno











Pz	Puzoso
Ca	Caliza
Ar.	Arcillas
Cz	Cuarzo
Cx	Cedazo

Abrev. Tipo de Estructura

SJ	Sistema de juntas
HJ	Juntas Horizontales
FI	Falla
SI	Estribo

CROQUIS

Anexo N° 8. Simbología cromática por calidad de roca (Osinerghin, 2017)

Categoría		RMR	Código de Colores	Descripción
I	I-A	91-100		Roca muy buena I-A
	I-B	81-90		Roca muy buena I-B
II	II-A	71-80		Roca buena II-A
	II-B	61-70		Roca buena II-B
III	III-A	51-60		Roca regular III-A
	III-B	41-50		Roca regular III-B
IV	IV-A	31-40		Roca mala IV-A
	IV-B	21-30		Roca mala IV-B
V	V-A	11-20		Roca muy mala V-A
	V-B	0-10		Roca muy mala V-B



FICHA TECNICA PERNO ANCLAJE SPLIT SET

HF FABRICACIONES SAC
Av. Los Faisanes 153 J501
La Campiña Chorrillos.
Teléfono: (01) 252-7655
Email: ventas@hffabricaciones.com
Web: www.hffabricaciones.com

FICHA TECNICA DEL SPLIT SET

DESCRIPCION

Tubo de acero ranurado en toda su longitud y en donde uno de sus extremos es conecado para facilidad e ingreso inicial del perno y en el otro extremo lleva un anillo soldado para mantener fija la placa luego de su instalación en el macizo rocoso. Usado como sostenimiento temporal y que actúa por fricción generando una presión radial en toda su longitud luego de su instalación.



CARACTERISTICAS DEL TUBO

Norma : Acero ASTM A-607 Grado 60 o similar

Presentaciones : En fierro negro y a solicitud del cliente galvanizados

Resistencia a la fluencia (MPa) : 450

Resistencia a la tensión (MPa) : 560

Elongación (%) : 20

MATERIAL PLACA DE SUJECION: Acero Calidad ASTM A 36

Espesor (mm) : 4.50 mm

Placa Cuadrada (mm) : 150 mm

Diámetro del agujero (mm) : 42 mm

MAQUINAS PARA SU INSTALACION

Maquina Jackleg o

Maquina Jumbo

Presión Aire: 60 – 80 Psi

DATOS TECNICOS

Capacidad de anclaje: 1.0 a 1.5 Ton/pie

Diámetro de la perforación : 35 a 37 mm.



FICHA TECNICA

PERNO ANCLAJE SPLIT SET

HF FABRICACIONES SAC
Av. Los Faisanes 153 J501
La Campiña Chorrillos.
Teléfono: (01) 252-7655
Email: ventas@hffabricaciones.com
Web: www.hffabricaciones.com

SUMINISTRO

Paquetes de 200 unidades

PRINCIPALES DIMENSIONES	
Diámetro base	40 mm ± 0.5
Diámetro de ahusamiento	32mm
Espesor del material	2.5mm ± 0.2
Longitud de ahusamiento	60mm

LONGITUDES SUMINISTRADAS	
4'	1,200 mm
5'	1,500 mm
6'	1,800 mm
7'	2,100 mm
8'	2,400 mm
10'	3,000 mm



PLACA DE SUJECION DEL SPLIT SET



El perno de fortificación producido por CAP ha sido diseñado para reforzar y preservar la resistencia natural que presentan los estratos rocosos, suelos o taludes. Consiste en una barra de acero con resaltes en forma de hilo helicoidal de amplio paso que actúa en colaboración con un sistema de fijación formado por una placa perforada de acero y una tuerca.

NORMA ASTM A615

GRADO	DIÁMETRO (mm)	CARGA RUPTURA (kgf)	ALARGAMIENTO (%)
GR.40	19	12.500	12
	22	16.500	12
	25	21.000	12
GR.60	19	18.000	8
	22	24.000	8
	25	31.000	8
GR.75	19	20.000	7
	22	27.000	7
	25	34.500	7

NORMA ASTM A706

GRADO	DIÁMETRO (mm)	CARGA RUPTURA (kgf)	ALARGAMIENTO (%)
GR.60	22	21.500	12
	25	27.500	12
GR.80	22	27.000	12
	25	35.000	12

NORMA Nch-204

GRADO	DIÁMETRO (mm)	CARGA RUPTURA (kgf)	ALARGAMIENTO (%)
A440	19	13.000	16
	22	17.000	16
	25	22.000	16
A630	19	18.500	8
	22	24.500	8
	25	31.500	8

GRADOS DE RESISTENCIA

Los pernos de fortificación poseen características mecánicas equivalentes a las barras para refuerzo de hormigón armado y se fabrican en diferentes calidades según las normas.

DIÁMETROS

Los diámetros nominales son 19, 22 y 25 mm. Otros diámetros sujetos a consulta.

LARGOS

Se suministran solo rectos, en largos a pedido con un máximo de 12 m. Largos diferentes pueden ser suministrados sujetos a una consulta previa.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se producen en base a aceros al carbono, pudiendo tener pequeñas adiciones de elementos microaleantes tales como el Nb, V u otros, para los grados de mayor resistencia.

ÚNICOS CON TRAZABILIDAD EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN

CAP, comprometido con la confiabilidad de los procesos y sobre todo con la **SEGURIDAD** de las personas que laboran en la minería, ofrece la posibilidad de incorporar la trazabilidad de la barra.





**DISEÑO DE MEZCLAS DE SHOTCRETE VIA HUMEDA
PROYECTO CHAQUICOCHA UG**

**AREA DE
GEOMECANICA**

Fecha	03.01.18	Nombre Proyecto	CHAQUICOCHA UG
Diseño	350 kg/cm ²	N° Expediente	
Relación a/c	0.400	Slump pulgadas	6" a 8"
Relación AF : AG	-	Volumen de Prueba (m3)	1.0000

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA MEZCLA DE PRUEBA

M.F. Arena	0.00	Vol. Agregados:	0.57	Cementante total	:	510	kg	
M.F. Piedra # 67	0.00	Ag Global	100 %	Microsilica	:	0	%	
M.F. Piedra # 56	0.00		0 %	Dosificación				Gal
M.F. Global	0.00		0 %	plastificante	=	0.5	% =	2.50 KG 1.13
		Agregados	100 %	aceletante	=	4.9	% =	25.00 KG 4.72
				fibra	=	0.8	% =	4.00 KG

MATERIALES	PROCEDENCIA	P. ESP kg/m ³	HUM. %	ABS. %	PESO SECO kg/m ³	VOL.	VOL. %	PESO S.S.S. kg/m ³	CORRECCIÓN POR HUMEDAD	DOSIFICACION		
										m3	3m3	UMID.
Cemento	CEMENTO PACASMAYO	3160			510	0.1614	16.1392	510	510	510	1530	kg
Microsilica		2200			0	0.0000	0.0000	0	0.0	0	0	kg
Agua	MINA	1000			190	0.1900	19.0000	207	113	113	340	kg
Ag Global	HUAMBOCANCHA	1667	6.00	1.10	1567	0.5656	56.5623	943	1667	1667	5001	kg
		0	0.00	0.00	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	kg
		0	0.00	0.00	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	kg
plastificante	DBASSF	1080			2.50	0.0023	0.2314	2.50	2.50	2	7	lit
aceletante	DBASSF	1500			25.00	0.0167	1.6667	25.00	25.00	25	75	lit
fibra	ELASTO PLASTIC	1000			4.00	0.0040	0.4004	4.00	4.00	4	12	kg
Aire					6.00%	0.0600	6.0000					
TOTAL					2299	1.0000	100.0000		2322	2322	6965	



Cajamarca, 7 de Diciembre del 2020.

Ing. Marco Hoyos Saucedo.
Director de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Minas - Universidad Nacional de Cajamarca.
Presente. –

De nuestra consideración:

Sirva la presente para saludarlo y manifestarle nuestro agradecimiento a nombre de Minera Yanacocha por habernos considerado como una opción para el desarrollo y crecimiento profesional de sus estudiantes.

Respecto a la solicitud, recibimos frecuentemente formatos de su representada referidos al otorgamiento de autorización para el uso de información de Minera Yanacocha en la elaboración de temas de tesis en curso ante ustedes, en tal sentido queremos aprovechar la oportunidad para precisarles que en cualesquiera de tales casos, debido a su carácter privilegiado o confidencial, *autorizamos el uso de la información para fines académicos*, debiéndose guardar la reserva correspondiente, a salvo del acto público de sustentación. En igual sentido, desde ya hacemos notar que la publicación o divulgación por cualquier medio de la tesis, en tanto maneja información que nos es privativa, requerirá el consentimiento escrito y expreso de Minera Yanacocha S.R.L. para lo cual el/la tesista deberá suscribir con nuestra empresa el compromiso correspondiente conforme a nuestros formatos.

Asimismo, quisiéramos confirmar que mi representada, ha decidido aceptar el desarrollo del tema de tesis “Evaluación Geomecánica para el Diseño del Sostenimiento del Túnel de Exploración Chaquicocha Fase II – Minera Yanacocha S.R.L, 2018” en el área de Mina, elaborada por su estudiante, Bachiller de la carrera de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Cajamarca:

- Edilberto Herrera Irigoín – DNI N° 76480342

La referida aceptación se ha formulado en el marco de lo señalado precedentemente con las limitaciones expresadas.

Igualmente debemos expresarle que, con fines de uniformizar la gestión de las referidas autorizaciones, estas deberán ser solicitadas ante nuestra Área de Políticas Públicas y Relaciones Gubernamentales, para un adecuado control de estas, mediante una acreditación de su representada.

Finalmente queremos reiterarle nuestro agradecimiento por su interés en considerarnos como parte de sus opciones de colaboración con la formación de sus estudiantes, y le extendemos nuestros deseos de éxito y consideración.

Atentamente,

Nahil Hirsh Carrillo
Gerente Senior Políticas Públicas y Relaciones Gubernamentales



Universidad Nacional de Cajamarca
Norte de la Universidad Peruana



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

La que suscribe, Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca certifica la originalidad de la tesis “EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA FASE II - MINERA YANACocha SRL, 2018”, elaborada por el bachiller en Ingeniería de Minas EDILBERTO HERRERA IRIGOÍN, de acuerdo al análisis realizado por el Asesor Ingeniero Roberto Severino Gonzales Yana, con el software antiplagio Urkund que reporta 9 % de índice de similitud y le asigna el código D91174147.

La Unidad de Investigación expide el presente, para los fines convenientes.

Cajamarca, 05 de marzo del 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rosa Haydee Llique Mondragón'.

Dra. Rosa Haydee Llique Mondragón
DIRECTORA UNIDAD INVESTIGACIÓN FI