

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA
DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG
CAJAMARCA – PERÚ**

Para optar el Título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

Autor:

Bach. Llanos Perez Juan Carlos

Asesor:

Dr. Quispe Mamani Crispín Zenón

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador : Juan Carlos Llanos Perez
2. DNI : 76411265
3. Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
4. Asesor : Crispín Zenón Quispe Mamani
Facultad : Ingeniería
5. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
6. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
7. Título de Trabajo de Investigación: IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA – PERÚ.
8. Fecha de evaluación : 21 de diciembre de 2025
9. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
10. Porcentaje de Informe de Similitud : 11%
11. Código Documento : Trn: Oid: **3117: 542615271**
12. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO
13. Fecha Emisión : 22 de diciembre de 2025



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: Crispín Zenón Quispe Mamani

DNI : 29243825



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 22/12/2025 18:50:14-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA - PERÚ

ASESOR : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0769-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 24 de diciembre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta días del mes de diciembre de 2025**, siendo las ocho horas (08:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario : M.Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA - PERÚ**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas **JUAN CARLOS LLANOS PEREZ**, asesorado por el Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani, para la obtención del Título Profesional

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

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 10 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 14 PTS.

..... CATORCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de CATORCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 7.00 pm horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique
Presidente

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

M.Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud en primer lugar va dirigida a Dios, Todopoderoso; nuestro creador por la vida, la salud y haber permitido lograr este propósito.

A mis padres Felix Llanos Gallardo y Olga Pérez Burga, que estuvieron siempre dándome todo su apoyo y me impulsaron a seguir adelante.

A mi alma mater la Universidad Nacional de Cajamarca y a mi asesor Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani, que desde un principio me guió con esmero y experiencia para poder culminar esta tesis satisfactoriamente.

DEDICATORIA

A Dios:

por darme la vida, ser mi fortaleza en los
momentos más difíciles y permitirme llegar
hasta este momento tan importante de mi
formación profesional.

A mis padres:

Felix Llanos Gallardo y Olga Pérez Burga
por su apoyo incondicional, ser mi motor
y motivo en la vida.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes teóricos	4
2.2. Bases teóricas	5
2.2.1. Sostenimiento.....	5
2.2.2. Clasificación geomecánica RMR.....	7
2.2.3. Resistencia uniaxial de la Matriz Roca	9
2.2.4. Índice de Calidad de la Roca: RQD	10
2.2.5. Sostenimiento a partir del índice RMR.....	11
2.2.6. Sostenimiento con Shotcrete	12
2.2.7. Perno de anclaje de barra hueca.....	12
2.2.8. Grouting	14
2.2.9. Perno fibra de vidrio	15
2.2.10. Azufre nativo	17
2.2.11. Azufre elemental.....	17
2.2.12. Sulfuros	17
2.2.13. Estabilidad.....	18
2.3. Definición de términos.....	19
CAPÍTULO III.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21

	Pág.
3.1. Ubicación de la investigación	21
3.1.1. Ubicación geográfica	21
3.1.2. Accesibilidad.....	22
3.2. Metodología de la investigación	23
3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación	23
3.2.2. Población de estudio	23
3.2.3. Muestra	23
3.2.4. Unidad de análisis	23
3.2.5. Definición de variables	24
3.2.5.1. Variable dependiente.....	24
3.2.5.2. Variable independiente	24
3.3. Técnicas y de recolección de datos	25
3.3.1. Técnicas	25
3.3.2. Recursos, materiales y equipos	26
3.4. Generalidades del Proyecto Subterráneo Chaquicocha UG.....	26
3.4.1. Antecedentes Generales	26
3.4.2. Ciclo de minado en el Proyecto Chaquicocha UG.....	26
3.4.3. Túnel del Proyecto Chaquicocha UG.....	28
3.4.4. Propiedades del Macizo Rocosó en Chaquicocha UG.....	32
3.4.5. Tipos de alteración en Chaquicocha UG	34
3.4.6. Clasificación del Macizo Rocosó en Chaquicocha UG	35
3.5. Antiguo método de Sostenimiento en Chaquicocha UG	36
3.6. Evaluación geotécnica del Nv. 3750.....	40
3.6.1. Resistencia de la Roca Intacta.....	41
3.6.2. Distribución de Discontinuidades	41
3.6.3. Caracterización geomecánica para determinar el RMR.....	42
3.7. Nuevo método de Sostenimiento en Chaquicocha UG.....	43
3.7.1. Sostenimiento Primario.....	43
3.7.2. Sostenimiento Secundario.....	44
3.7.3. Aplicación del Shotcrete en el sostenimiento	45
3.7.4. Aplicación de Resina a Granel Bombeable para el sostenimiento	47
3.8. Evaluación del Sostenimiento en excavaciones.....	48
3.9. Secuencia de instalación del Nuevo Método de Sostenimiento en el Nv. 3750	49

	Pág.
3.9.1. Secuencia de instalación en labores de desarrollo	49
3.9.1.1. Roca tipo III, Calidad “Regular” y RMR > 40	49
3.9.1.2. Roca tipo III, calidad “Regular”, con soporte secundario y RMR > 40	51
3.9.1.3. En Roca tipo IV, calidad “Mala” y RMR entre 21 – 40	53
3.9.1.4. En Roca tipo V, calidad “Muy Mala” y RMR < 20	55
3.9.2. Secuencia de instalación en intersecciones de desarrollo	57
3.9.2.1. Intersección de 3 vías:	57
3.9.2.2. Intersecciones Cruz o de 4 vías:	59
3.10. Cantidad de Shotcrete lanzado en la rehabilitación del sostenimiento	61
3.11. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en el Nv. 3750	62
3.12. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en Intersecciones	63
CAPÍTULO IV	64
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
4.1. Calidad del macizo rocoso del Nv. 3750	64
4.2. Análisis de Estabilidad de Excavaciones en el software de NIOSH	65
4.2.1. Análisis en el software de NIOSH en Roca tipo III	66
4.2.2. Análisis en el software de NIOSH en Roca tipo III con soporte secundario	67
4.2.3. Análisis en el software de NIOSH en Intersecciones	68
4.3. Control de Calidad del Sostenimiento	69
4.3.1. Ensayos de Pull Test	69
4.3.2. Control de calidad del Shotcrete	71
4.3.2.1. Ensayos de resistencias tempranas del shotcrete	71
4.3.2.2. Ensayos de compresión simple del shotcrete	72
4.4. Contrastación de la Hipótesis	74
CAPÍTULO V	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de clasificación RMR	8
Tabla 2. Corrección por orientación de discontinuidades.....	9
Tabla 3. Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR - Chaquicocha UG.....	9
Tabla 4. Ensayos de Índice manual de resistencia de roca en campo.....	10
Tabla 5. Calidad del macizo rocoso según el índice RQD	11
Tabla 6. Sostenimiento a partir del índice RMR	11
Tabla 7. Mezcla referencial de shotcrete con fibra metálica y micro sílice ($f'_c = 350$ kg/cm ²).....	12
Tabla 8. Características del perno de anclaje de barra hueca	13
Tabla 9. Características perno de fibra auto perforantes	16
Tabla 10. Características de tuercas de fibra	16
Tabla 11. Operacionalización de variables	24
Tabla 12. Resumen de las pruebas de mecánica de rocas para las tres principales unidades de alteración.....	33
Tabla 13. Clasificación de riesgo por contenido de Azufre, en una posible o probable ignición de polvos en Chaquicocha	35
Tabla 14. Comparación de RMR y sistema Q en perforaciones registradas en el proyecto Chaquicocha UG.....	35
Tabla 15. Comparación de RQD en perforaciones registradas en el proyecto Chaquicocha UG.....	36
Tabla 16. Ensayos de resistencia a la carga puntual	41
Tabla 17. Caracterización geomecánica del Nivel 3750.....	42
Tabla 18. Clases de hormigón proyectado de la Sociedad Austriaca del Hormigón.....	47
Tabla 19. Factor de Seguridad de las excavaciones según el tiempo de estabilidad	48
Tabla 20. Factor de Seguridad de las excavaciones según el tiempo de estabilidad en el proyecto Chaquicocha U.G.....	48
Tabla 21. Cantidad de shotcrete lanzado en la rehabilitación del Nivel 3750.....	61
Tabla 22. Cantidad de Pernos instalados y consumo de resina en la rehabilitación del Nivel 3750	62

	Pág.
Tabla 23. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en las Intersecciones del Nivel 3750.....	63
Tabla 24. Clasificaciones geomecánicas RMR en el Nv. 3750	64
Tabla 25. Resultados de los ensayos de pull test en pernos con fibra de vidrio	70
Tabla 26. Ensayo de resistencia a la compresión simple de paneles de shotcrete en el Nv. 3750	73

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de la investigación	21
Figura 2. Accesibilidad al Proyecto Chaquicocha Subterráneo	22
Figura 3. Ciclo de minado en el Proyecto Chaquicocha U.G.....	28
Figura 4. Vista en planta de las labores subterráneas en Chaquicocha año 2021	29
Figura 5. Se puede observar indicios de sulfuro en la parte superior (corona o techo) de la intersección del CX 150 NW y RP 3750 SE en la inspección subterránea del 23 de agosto de 2022.....	30
Figura 6. En la imagen de la parte izquierda se observa una placa corroída en el suelo además de presenciar una coloración anómala en el hastial producto de los sulfuros en el nivel 3730. En la imagen de parte derecha se observa un perno rebar encontrado en el piso durante una inspección en enero de 2023, este perno falló debido a la corrosión.....	31
Figura 7. En el hastial izquierdo de la PK0+260 en la GA 179 NW del nivel 3732 se puede observar que la malla electrosoldada y el Split set se encuentran corroídos, se presume que están así debido a la composición sulfurosa en el macizo rocoso.	31
Figura 8. Alteraciones geológicas en Chaquicocha UG – Nv. 3750	34
Figura 9. Tabla geomecánica para la clasificación del macizo rocoso - Chaquicocha UG.....	37
Figura 10. Recomendación del antiguo estándar de sostenimiento en Chaquicocha UG	38
Figura 11. Método de Sostenimiento en Chaquicocha UG entre el año 2015 – 2020	39
Figura 12. Estado actual del sostenimiento en Chaquicocha UG encontrado en el año 2023, donde se puede ver que está totalmente corroído por la presencia de sulfuros.	39
Figura 13. Distribución de Discontinuidades del Nivel 3750	41
Figura 14. Diseño del Shotcrete tipo V con una relación agua/cemento de 0.30.....	46
Figura 15. Clases de resistencia inicial para Shotcrete de la Sociedad Austriaca del Hormigón.....	46
Figura 16. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca Tipo III, Calidad "Regular" y RMR > 40.....	50

Figura 17. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca Tipo III, Calidad "Regular" con soporte secundario y $RMR > 40$	52
Figura 18. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca tipo IV, calidad "mala" y $RMR 21 - 40$	54
Figura 19. Diseño del sostenimiento el en software AutoCAD para Roca tipo V, calidad "muy mala" y $RMR < 20$	56
Figura 20. Diseño del sostenimiento con el software AutoCAD en intersección de 3 vías	58
Figura 21. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD en intersección Cruz o de 4 vías	60
Figura 22. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Roca tipo III	66
Figura 23. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Roca Tipo III con soporte secundario.	67
Figura 24. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Intersecciones	68
Figura 25. Ensayos de pull test aplicados a pernos de fibra de vidrio con la máquina de arranque de pernos ENERPAC	70
Figura 26. Manómetro marcando 14 TN de resistencia a la tracción en la progresiva PK0+060 de la RP 3750 – Chaquicocha UG.....	71
Figura 27. Resistencias tempranas obtenidas en el lanzado de Shotcrete en el Nv. 3750.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

UG	:	Underground
ARM	:	AESA Redpath Minig
MINEM	:	Ministerio de energía y minas
FS	:	Factor de Seguridad
RMR	:	Valoración del macizo rocoso
RQD	:	Índice de calidad de roca
Q	:	Calidad del macizo rocoso
GSI	:	Índice de resistencia geológica
IS	:	Índice de carga puntual
UCS	:	Resistencia a la comprensión simple
Km	:	Kilometro
m	:	Metro
cm	:	Centímetro
mm	:	Milímetro
Nv	:	Nivel
NIOSH	:	Calculadora del factor de seguridad de soporte del terreno
TN	:	Tonelada
Mpa	:	Megapascal
GPa	:	Gigapascal
Osinerghmin	:	Organismo supervisor de la inversión en energía y minería
F [´] c	:	Fuerza de compresión
kN	:	Kilonewton
Kg	:	Kilogramo
gr	:	Gramo
L	:	Litro
Nm	:	Newton metro
%	:	Porcentaje
Pág.	:	Página
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
GPS	:	Sistema de posicionamiento global
N	:	Norte
S	:	Sur
E	:	Este
W	:	Oeste
RP	:	Rampa
GAL	:	Galería
PK	:	Progresiva
CX	:	Crucero
PVC	:	Policloruro de vinilo

RESUMEN

Esta investigación se realizó en el Nivel 3750 del Túnel Chaquicocha – Minera Yanacocha, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca. El objetivo es implementar un nuevo método de sostenimiento para darle estabilidad al Nv. 3750 el cual se encuentra severamente corroído por la alta presencia de sulfuros, analizando la calidad del macizo rocoso mediante clasificaciones geomecánicas de RMR, la estabilidad de las excavaciones subterráneas mediante el software NIOSH y la calidad del sostenimiento mediante pruebas de pull test y ensayos de compresión simple. El procedimiento consiste en lanzar Shotcrete de 2”, colocar pernos de fibra de vidrio de 2.4 m, 3 m y 6 m con grouting, en las intersecciones colocar pernos de fibra de vidrio de 6 m y reforzarlos con pernos de barra hueca de acero galvanizado de 6 m, la cantidad y longitud del perno que se coloca depende del tipo de roca, del daño causado por la corrosión y del tipo de excavación. Los resultados según el RMR indican que el tipo de roca del Nv. 3750 es de tipo III (regular), con zonas puntuales de tipo IV (mala), el factor de seguridad analizado en el software NIOSH, resulto ser mayor a 1.50, la calidad del sostenimiento mediante pruebas de Pull test en pernos de fibra de vidrio dan una resistencia a la tracción mayor a 10 TN y el Shotcrete adquiere una resistencia mayor a 35 Mpa después de 28 días. Por lo tanto, este método de sostenimiento resulta ser estable y seguro, teniendo como recomendación inspeccionar periódicamente el desempeño del nuevo sostenimiento y verificar el comportamiento a largo plazo de los pernos de fibra de vidrio.

Palabras claves: sostenimiento, corrosión, sulfuros, pernos de fibra de vidrio, estabilidad.

ABSTRACT

This investigation was conducted at Level 3750 of the Chaquicocha Tunnel - Yanacocha Mine, located in the province and department of Cajamarca. The objective is to implement a new support method to stabilize Level 3750, which is severely corroded by the high presence of sulfides. The rock mass quality was analyzed using RMR geomechanical classifications, the stability of underground excavations using NIOSH software, and the support quality was analyzed using pull tests and simple compression tests. The procedure consists of launching 2" Shotcrete, placing 2.4 m, 3 m and 6 m fiberglass bolts with grouting, at the intersections place 6 m fiberglass bolts and reinforce them with 6 m galvanized steel hollow bar bolts, the quantity and length of the bolt that is placed depends on the type of rock, the damage caused by corrosion and the type of excavation. The results according to the RMR indicate that the rock type of Lv. 3750 is type III (regular), with specific areas of type IV (bad), the safety factor analyzed in the NIOSH software, turned out to be greater than 1.50, the quality of the support through Pull test tests on fiberglass bolts give a tensile strength greater than 10 TN and the Shotcrete acquires a resistance greater than 35 Mpa after 28 days. Therefore, this support method turns out to be stable and safe, having as a recommendation to periodically inspect the performance of the new support and verify the long-term behavior of fiberglass bolts.

Key Words: support, corrosion, sulfides, fiberglass bolts, stability.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

El sostenimiento en minería subterránea es parte del ciclo de minado y es fundamental realizarlo para dar estabilidad a la labor minera y poder continuar con el avance y producción, además este proceso es esencial para proteger de accidentes al personal y a los equipos. Existen dos tipos de sostenimiento en minería subterránea y en el nivel 3750 Chaquicocha UG de Minera Yanacocha esta implementado ambos: sostenimiento pasivo (shotcrete y malla electrosoldada), sostenimiento activo (Split set y pernos swellex); pero el macizo rocoso presenta en su composición un alto puntaje de sulfuros, lo cual en un lapso no mayor a 5 años ha generado corrosión en este tipo de sostenimiento, volviendo a la labor minera inestable.

Se sugiere reemplazar este método de sostenimiento por otro que sea capaz de trabajar en rocas con alta presencia de sulfuros, el método de sostenimiento más recomendado para utilizar es shotcrete y pernos con fibra de vidrio en tramos donde la roca es III y IV; y shotcrete con pernos de anclaje de barra hueca (acero galvanizado) en las intersecciones donde soporta más carga, este método de sostenimiento tienen la capacidad de soportar la alta presencia de sulfuros, garantizando así la estabilidad del nivel 3750 en el tiempo. Frente a este contexto se plantea la siguiente pregunta ¿Cual la importancia de la implementación de un nuevo método de sostenimiento en zona de sulfuro para la estabilidad del nivel 3750 Chaquicocha UG Cajamarca – Perú?

Por consiguiente, la justificación a la problemática ya expuesta anteriormente, se ha tenido como conveniente realizar este trabajo de investigación, en el cual se propone implementar un nuevo método de sostenimiento en zonas sulfurosas, que se encuentran en el nivel 3750 Chaquicocha UG – Yanacocha, departamento de Cajamarca.

La hipótesis de esta tesis es determinar los parámetros geotécnicos y su inestabilidad la cual viene a ser originada por la precipitación, infiltración, sismicidad y la presencia de sulfuros; las cuales afectan las condiciones litológicas, geoestructurales, geomecánicas y tipo de sostenimiento por tal motivo se implementará un nuevo método de sostenimiento en zona de sulfuro para la estabilidad del nivel 3750 Chaquicocha UG Cajamarca – Perú.

Con la implementación de este nuevo método de sostenimiento se busca sustituir al método anterior, el cual no es eficiente y seguro, porque el material utilizado está fabricado a base de acero no galvanizado, este al estar en contacto con sulfuro, se corroe generando inestabilidad; con el nuevo método de sostenimiento se dará una mejor estabilidad al nivel, se colocara shotcrete de espesor 2 pulgadas y se reemplazara los pernos Split set por pernos con fibra de vidrio en tramos donde la roca es III y IV.

En las intersecciones se reemplazará los pernos rebar por pernos de anclaje de barra hueca con grouting, dando así una mejor vida útil a la mina, beneficiando a la empresa minera y brindando mejor seguridad para el personal y equipos que laboran allí. El alcance metodológico es: descriptivo, correlacional, explicativo y científico. No se presentó limitaciones para desarrollar el trabajo de investigación.

Teniendo como objetivo general de la investigación, implementar un nuevo método de sostenimiento en zona de sulfuro para la estabilidad del nivel 3750 Chaquicocha UG Cajamarca – Perú. Los objetivos específicos son: determinar la calidad del macizo rocoso de la labor minera mediante clasificaciones geomecánicas de RMR, examinar la estabilidad de las excavaciones subterráneas mediante el software NIOSH, analizar la calidad del sostenimiento mediante pruebas de pull test y ensayos de comprensión simple.

El contenido de los capítulos es: en el capítulo I, se describe la introducción, junto con el planteamiento del problema, hipótesis, justificación, delimitación y los objetivos de la investigación. En el capítulo II, el marco teórico, teniendo en cuenta las bases teóricas de diferentes fuentes, autores y la definición de términos básicos. En el capítulo III, la descripción de los materiales y métodos, donde se inicia con la ubicación geográfica, accesibilidad, los procedimientos de gabinete y campo, también se describirá el proceso de la investigación, los métodos, técnicas a utilizar y la presentación de resultados. En el capítulo IV, análisis y discusión de resultados, donde se implementará el nuevo método de sostenimiento en zona de sulfuros. En el capítulo V, se presenta las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

Según (Rodriguez, 2022), presenta su tesis de investigación “Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento Necesario Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo Rocosó en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble”. En esta tesis se estableció el diseño de sostenimiento a ejecutar en las labores temporales y permanentes del nivel 1712 del cuerpo Zeus en la mina El Roble siguiendo los criterios de calificación internacional de macizos rocosos, Rock Mass Rating (RMR) y Geological strength Index (GSI) (Bieniawski, 1989; Hoek y Marinos, 2000), usando criterios geomecánicos se estableció un sostenimiento adecuado para la estabilidad de las labores mineras.

Asimismo (Ampuero, Castañeda, & Lezama, 2015), en su tesis de maestría titulada “Propuesta de aplicación del método de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento”, el objetivo principal de la investigación es mejorar el Sistema de Sostenimiento de una Mina Subterránea mediante la aplicación del sistema de relleno con mortero de relave, generándose un valor agregado ambiental que mejora los resultados de la organización, así mismo el método de relleno con mortero de relave mejora la confiabilidad del sostenimiento.

Además (Herrera, 2021), dice en su tesis “Evaluación geomecánica para el diseño del sostenimiento del túnel de exploración Chaquicocha fase ii - minera Yanacocha SRL, 2018” concluye que 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. En conclusión, esta tesis resalta la combinación de sostenimiento activo como pasivo, lo cual mejora el rendimiento, pero no garantiza la resistencia en el tiempo ya que en el transcurso se puede generar otro tipo de fallas, generando inestabilidad.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Sostenimiento

El término “sostenimiento” es usado aquí para cubrir los diversos aspectos relacionados con los pernos de roca (de anclaje mecánico, de varillas de fierro corrugado o barras helicoidales ancladas con cemento o con resina, Split sets y swellex), cables, malla, cintas de acero (straps), concreto lanzado (shotcrete) simple y con refuerzo de fibras de acero, cimbras de acero, gatas, madera (puntales, paquetes, cuadros y conjuntos de cuadros), relleno y algunas otras técnicas de estabilización de la masa rocosa. Todos estos elementos son utilizados para minimizar las inestabilidades de la roca alrededor de las aberturas mineras. (López, 2019)

Según (Osinermin, 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. Para su diseño es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Las características del macizo rocoso.
- La influencia de esfuerzos naturales e inducidos.
- La dirección de la excavación con relación a los rasgos estructurales.
- La forma y las dimensiones de la excavación.
- La deformabilidad del macizo rocoso y de los elementos de sostenimiento a fin de que el diseño asegure la vida de servicio esperada de la excavación.

El tiempo transcurrido entre la ejecución de la excavación y la instalación del sostenimiento dependerá de las condiciones del macizo rocoso. En rocas de buena calidad, el sostenimiento podrá ser retrasado en el tiempo; en caso contrario, la instalación deberá realizarse lo más pronto posible: “la colocación tardía del sostenimiento en un determinado tramo, favorece la relajación y descompresión del macizo rocoso, pudiendo ser la causa de manifestaciones de inestabilidad” (LOM, 2015), (Osinerghmin, 2017).

Atendiendo como actúa en la roca, el sostenimiento podrá ser activo o pasivo:

- Sostenimientos pasivos: actúan en la superficie de la excavación o en su interior (ej. cimbras metálicas, cuadros de madera, concreto lanzado (shotcrete) y pernos cementados). Estos elementos pasivos requieren que la roca se desplace o deforme para recién empezar a actuar como soporte. (Los sostenimientos que se instalan en la superficie se les denomina, además de sostenimiento pasivo como soporte de roca).
- Sostenimientos activos: actúan en el interior del macizo rocoso (ej. pernos de anclaje tensados y cables de anclaje tensados). Son capaces de proporcionar refuerzo a la roca desde el instante mismo de su instalación, logrando que la roca forme una zona de compresión y participe en la estabilidad de la excavación (refuerzo de roca).

En minería subterránea mecanizada se utiliza la combinación de estos 2 tipos de sostenimiento, para determinar el tipo de sostenimiento se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Caracterización geomecánica del macizo rocoso.
- Tipo de maquinaria que transitara por la excavación.
- El tiempo para el que estará diseñado.
- Los costos de instalación del sostenimiento.

Según el autor del libro Ingeniería Geológica de Gonzales de Vallejo dichos sostenimientos son a partir del índice Q y a partir del índice RMR. En esta investigación se ha trabajado con el sostenimiento a partir del índice RMR y GSI.

2.2.2. Clasificación geomecánica RMR

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:

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 evaluación de estos parámetros mediante el análisis de un macizo rocoso indica la clasificación geomecánica RMR que tiene una valoración de 0 a 100. 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.

Tabla 1. 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	5		
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	4	3	2	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	4	3	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min		
		Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		

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

Obtenido el RMR básico mediante los 5 primeros parámetros, 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.

Tabla 2. 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 de 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 Favorables	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable	Media	Desfavorable

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

Cabe destacar que el sistema RMR ha tenido modificaciones en el transcurso del tiempo ya sea por Bienawski u otros autores debido a que la calidad del macizo rocoso implica en gran escala en el tipo de sostenimiento, en el caso del proyecto Chaquicocha UG utiliza el siguiente RMR:

Tabla 3. Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR - Chaquicocha UG

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

Fuente: Área de geomecánica del proyecto Chaquicocha UG

2.2.3. Resistencia uniaxial de la Matriz Rocosa

Según Gavilanes y Andrade (2004), la resistencia a la comprensión uniaxial de la roca intacta es probablemente la propiedad mecánica más empleada con fines geotécnicos y que se obtiene mediante ensayos de laboratorio. Se estima a partir de la siguiente tabla:

Tabla 4. 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, cuarcita, 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, siltstone
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

Fue creado por Deere en 1967, fue diseñado como una herramienta para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso. Sus formula viene dado de la siguiente manera:

1. Cálculo del RQD en función del número de diaclasas por metro lineal:

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

$$\text{Donde: } \lambda = \frac{\text{Nº de fisuras}}{\text{espaciamento}}$$

2. Cálculo de RQD en función del número de diaclasas por metro cubico:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 * J_v$$

Donde: J_v = número de fisuras por metro cubico

Tabla 5. 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).

2.2.5. Sostenimiento a partir del índice RMR

El índice RMR indica los tipos de sostenimiento a emplear en función al macizo rocoso. Las recomendaciones del sostenimiento del sistema RMR se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Sostenimiento a partir del índice RMR

Sostenimientos a partir del índice RMR				
Clase RMR	Excavación	Sostenimiento		
		Bulones	Gunita	Cerchas
I 100-81	Sección completa. Avance de 3m.	Innecesario, salvo algún bulón ocasional.	No.	No.
II 80-61	Sección completa. Avance 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. Avance 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 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 < 20	Fases múltiples. Avances de 0,5-1 m. Gunitar inmediatamente el frente después de cada avance.	Bulonado sistemático de 5-6m, con separaciones 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/cm ² .				

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

2.2.6. Sostenimiento con Shotcrete

El concreto lanzado (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). Se utilizan dos procesos de mezclado: mezcla seca y mezcla húmeda. La tendencia actual es emplear el concreto reforzado con fibras de acero y/o sintéticas, el concreto tiene dos efectos, el primero es cuando sella la superficie de la roca cerrando las fracturas y el segundo evita la descompensación y la alteración de la roca. (Osinergmin, 2017)

Tabla 7. Mezcla referencial de shotcrete con fibra metálica y micro sílice ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$)

Componentes	Mezcla seca		Mezcla húmeda	
	Kg/m ³	% materiales	Kg/m ³	% materiales
		Secos		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	-	-	sí requiere	
Agua	controlado a la boquilla		180	7.8
Total	2203	100	2311	100

Fuente: (Osinergmin, 2017), Mezcla referencial de shotcrete con fibra metálica y micro sílice ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$)

2.2.7. Perno de anclaje de barra hueca

Un anclaje de barra hueca es una barra de tensión que transfiere la carga desde la estructura de anclaje o material geotécnico a una formación estable. La inyección de presión en la varilla de anclaje a través del cuerpo de la varilla hueca puede lograr el propósito de consolidar la masa

rocosa fracturada, bloquear el agua subterránea y la anticorrosión del cuerpo de la varilla y formar rápidamente la fuerza de soporte para controlar la estabilidad de la roca circundante. (Top Metal, 2024)

Tabla 8. Características del perno de anclaje de barra hueca

Tipo	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Carga última (KN)	Carga de rendimiento (KN)	Peso (Kg/m)	Longitud (m)
R25N	25	14	200	150	2.3	2.4 m, 3 m, 6 m
R32L	32	22	260	200	2.8	2.4 m, 3 m, 6 m
R32N	32	21	280	230	2.9	2.4 m, 3 m, 6 m
R32/18.5	32	18.5	280	230	3.4	2.4 m, 3 m, 6 m
R32S	32	17	360	280	3.5	2.4 m, 3 m, 6 m
R38N	38	21	500	400	4.8	2.4 m, 3 m, 6 m
R38/19	38	19	500	400	5.5	2.4 m, 3 m, 6 m
R51L	51	38	550	450	6	2.4 m, 3 m, 6 m
R51N	51	33	800	630	7.6	2.4 m, 3 m, 6 m
T76N	76	49	1600	1200	16.5	2.4 m, 3 m, 6 m
T76S	76	45	1900	1500	19	2.4 m, 3 m, 6 m

Fuente: (Top Metal, 2024)

Según (Top Metal, 2024) nos describe las siguientes características y ventajas:

- El diseño hueco realiza la función de tubería de lechada y evita la pérdida de mortero causada por la tubería de lechada tradicional.
- Se puede realizar una inyección a presión para mejorar la calidad del proyecto.
- La neutralidad es buena, el mortero puede envolver toda la longitud del cuerpo del anclaje para evitar la oxidación y lograr un soporte a largo plazo.

- Es fácil de instalar y es conveniente instalar la placa y la tuerca sin mecanizar la rosca en el sitio donde será colocado.

2.2.8. Grouting

El Grouting sirve para nivelar estructuras y/o equipos, estos productos pueden ser cementicios y/o epóxicos, dependiendo las estructuras a nivelar. Y en el caso de los Anclajes se considera la instalación de varillas roscadas o barras corrugadas, post-instaladas con adhesivos epóxicos (Sika, 2024)

El Grout es un material compuesto generalmente de agua, cemento y arena. Se utiliza típicamente para rellenar los huecos bajo las máquinas u otros elementos estructurales, sellar juntas y aperturas en las superficies y reforzar las estructuras existentes. Dentro de ello se aplica el Sika AnchorFix®-3001 que es un adhesivo epóxico de dos componentes para el anclaje de barras corrugadas y pernos roscados. Fabricado con una tecnología de alta calidad y libre de estireno, el Sika AnchorFix®-3001 ha sido específicamente diseñado para proveer una alta resistencia para uso en condiciones secas, húmedas e inundadas en numerosos materiales de base. Es apropiado para cargas medianas y altas en aplicaciones estructurales y no estructurales. (Sika, 2020)

Según (Sika, 2020) los usos de este adhesivo son:

- Anclaje de barras corrugadas y pernos roscados en materiales sólidos (concreto, piedra, bloques rellenos con grout).
- Para aplicaciones en ambientes externos, sujetas a cargas dinámicas y vibraciones.
- Para aplicaciones horizontales, verticales y sobre cabeza (referirse a Limitaciones), en donde el fraguado lento permite un tiempo de manejabilidad extendido.

- Para anclajes en perforaciones más profundas o en aplicaciones que no deban ponerse en servicio de manera rápida.
- Para anclaje de acero estructural al concreto, barandas de seguridad, balcones, cubiertas corredizas (canopies), vallas, pasamanos, estantes, maquinaria, soportes en mampostería, asientos de escenarios deportivos, barras de acero.

2.2.9. Perno fibra de vidrio

El perno de fibra es un elemento fabricado en base a filamentos de fibra de vidrio en una matriz de polímero especialmente formulada, que le otorga al elemento altas propiedades mecánicas de resistencia bajo cargas de tracción. La deformación del perno de fibra es uniforme, dada su materialidad posee bajo peso.

El perno de fibra nace como la solución a problemas de fortificación en lugares altamente corrosivos y/o en sectores de recuperación en donde se busca minimizar daños a plantas de chancado por presencia de acero. (DSI Underground Group, 2024)

Ventajas de un perno de fibra de vidrio según (DSI Underground Group, 2024)

- Altamente resistentes a la corrosión.
- Pueden ser fácilmente cortados por maquinaria minera convencional.
- El tratamiento de la superficie minimiza la irritación superficial propia de la fibra de vidrio.
- No requiere condiciones de almacenaje especiales.
- De mucho más fácil manejo que los pernos de acero.

Tabla 9. Características perno de fibra auto perforantes

Especificación	Barra perforada			Autoperforantes	
Especificación	DSI_H25	DSI_H32	DSI_H38	DSI_A32	DSI_A38
Diámetro nominal interior/exterior (mm)	25/12	32/15	38/15	32/15	38/15
Sección transversal(mm)	310	485	800	485	800
Carga Ruptura (KN)	250	350	570	350	570
Tensión ultima(N/mm ²)	1000	1000	900	1000	900
Tensión Cizalle (N/mm ²)	460	400	350	400	350
Deformación ultima (%)	2.5	2.5	2	2.5	2
Módulo de elasticidad (GPa)	40	40	40	40	40
Torsión máxima (Nm)	100	200	300	280	350
Peso (g/m)	640	950	1750	950	1750
Dirección de hilo	Izquierdo	Izquierdo	Izquierdo	Izquierdo	Izquierdo
longitud	2.4 a 6 m	2.4 a 6 m	2.4 a 6 m	2.4 a 6 m	2.4 a 6 m

Fuente: (DSI Underground Group, 2024) Sistema perno de fibra DSI Underground

Tabla 10. Características de tuercas de fibra

Características	Tuercas para pernos de fibra				
Especificación	DSI_T20	DSI_T25	DSI_T27	DSI_T32	DSI_T38
Tuerca hexagonal A/L (mm)	36/70	41/80	48/80	46/100	53/100
Peso Tuerca Hexagonal (Kg)	0,075	0,11	0,14	0,15	0,22
Torque corte tuercas con Seguro (Nm)	40-80	50-90	50-90	80-110	80-110
Peso Tuerca (Kg)	0,18	0,16	0,15	0,29	0,45

Fuente: (DSI Underground Group, 2024) Sistema tuerca de fibra DSI Underground

2.2.10. Azufre nativo

Es un agente de corrosión para cualquier elemento común de fortificación requiere un tratamiento o característica especial en la composición de los elementos que interactúen de forma directa con el macizo rocoso. La presencia de azufre nativo entre fracturas y discontinuidades hace que la caracterización geomecánica, tenga que asumirse tomando como nuevo parámetro de estabilidad y fortificación la presencia de este elemento mineralógico. Los materiales de sostenimiento no pueden ser materiales genéricos que utilizamos en cualquier operación subterránea, sino que deben contar con ciertas características que sean resistentes al proceso de corrosión. (Huamani & Benites, 2016)

2.2.11. Azufre elemental

Se encuentra en la naturaleza en estado nativo sólido asociado con el oxígeno en gas sulfuroso, combinado con diferentes metales como el hierro, cobre, plomo, antimonio, mercurio y plata, formando muy variados minerales, en los que también en algunos puede estar el arsénico. (Ramírez & San José, 2006)

2.2.12. Sulfuros

En la clase de los minerales de azufre, que comprende los sulfuros, existe una gran diversidad de metales asociados al mismo. Entre ellos destacan la Pirita y la Marcasita, la Blenda y la Wurtzita, la Galena, la Antimonita, la Argentita, el Cinabrio, la Molibdenita y la Calcopirita. Según (Ramírez & San José, 2006), nos describe el porcentaje de azufre en los siguientes minerales:

- La Pirita y la Marcasita son bisulfuros de hierro ($S = 53,45\%$) con la misma composición, pero la primera cristaliza en el sistema cúbico y la segunda en el rómbico. La Pirita puede aparecer en forma de cubos y de dodecaedros aislados o en maclas de las dos formas y de

color brillante amarillo latón. Una característica, por la que le viene su nombre, es que da chispas al golpearla con el eslabón. La Marcasita se presenta en agrupaciones en forma de «cresta de gallo», o en estructura fibrosoradiada aplastada.

- La Calcopirita es un sulfuro doble de cobre y hierro, que tiene un 35% de azufre, cristaliza en el sistema tetragonal, en cristales de color amarillento y frecuentemente con irisaciones azules o negras, debidas a la formación de óxidos de hierro, sulfatos y carbonatos de cobre, producidos por la meteorización causada por la humedad y el aire. Este mineral es la mena más importante para obtener el cobre, metal básico en la industria eléctrica, de calderería, y en aleaciones como el latón, bronce, etc., habiéndose explotado en las minas del Castillo de los Guardas (Sevilla), Massanet de Cabrenys (Girona), Villamanín (León), Gargantilla de Lozoya y Colmenar del Arroyo (Madrid), entre otros.

2.2.13. Estabilidad

“Situación de seguridad estructural, que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas desestabilizadoras que pueden afectar obras o depósitos de una faena minera, para la cual se utilizan medidas con el fin de evitar fenómenos de falla, colapso o remoción”. (Ley N° 20551, 2020).

Según el (Laboratorio oficial JM. Madariaga, 2015) en las excavaciones subterráneas se puede producir la rotura del terreno alrededor de la excavación, a partir de inestabilidades como convergencia excesiva, derrames, hundimientos y estallidos de roca, entre otros. El conocimiento de la magnitud y dirección del estado tensional del terreno es una parte esencial del diseño de excavaciones subterráneas, pues en muchos casos las tensiones inducidas alrededor de la excavación superan a la resistencia del macizo rocoso.

2.3. Definición de términos

Factor de seguridad: 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) (Osinergmin, 2017)

Sulfuro: Es un elemento amarillo brillante, combustible, no metálico, de origen natural y se encuentra en todo el mundo. El sulfuro puede ser abrasivo, así como corrosivo, por lo que debe tenerse cuidado de utilizar equipos que puedan soportar la exposición prolongada al sulfuro. (Flexicon, 2024)

Macizo rocoso: Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico. (Rodríguez, 2007)

Perno de anclaje: Los pernos de anclaje se utilizan para conectar elementos estructurales y no estructurales al hormigón. La conexión se realiza mediante el ensamblaje de diferentes componentes como pernos de anclaje (también llamados sujetadores), placas de acero, refuerzos. (Sassani, 2020)

Shotcrete: Es un tipo de concreto que se aplica a través de una manguera de alta presión que dispara o impulsa el material para que este se adhiera a la superficie. sirve para reforzar y proteger las paredes y el techo de las excavaciones subterráneas, tanto en minería como en obras civiles. Además, reduce los riesgos asociados a derrumbes. (Conar SAC, 2023)

Resina: Usado para anclajes de pernos roca en minería y tunelería, pernos autoperforantes en terrenos de mediana a mala calidad, o cualquier otra aplicación en la cual se pueda reemplazar la lechada de cemento como medio de anclaje. (DSI Underground Group, 2024)

Inestabilidad: Denominada deslizamiento, corresponde a la movilización de masas formadas por rocas, suelos, rellenos antrópicos o mezclas de los anteriores, sobre una superficie de rotura que se presenta en el talud, inclinación del talud y tipología del terreno, etc., determinan el tipo y velocidad del deslizamiento. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018)

Labor minera: Se denominan labores mineras a los huecos de distintas formas que deben ejecutarse para llegar al criadero o yacimiento, enlazarlo con la superficie, dividirlo en secciones de forma y tamaño racionalizado y normalizado, y arrancar el mineral de una manera ordenada, segura y económica. (Herrera J. , 2017)

Pruebas de pull test: Son pruebas de extracción de componentes metálicos, insertados antes o después de que se coloque el concreto para determinar la resistencia mecánica del material. La prueba se ejecuta conectando el perno de prueba a un gato hidráulico que lo saca cuando está presurizado. La fuerza medida por el manómetro se analiza y se compara con curvas de correlación para determinar la resistencia del material. (Geoteknik S.A.C., 2024)

Ensayos de compresión simple: El ensayo de compresión simple tiene como objetivo determinar la resistencia máxima a la compresión de una muestra cilíndrica de testigo, la cual es sometida a una carga axial sin ninguna carga de confinamiento, que debe ser aplicada de manera continua e incrementada gradualmente hasta que la muestra falle. El esfuerzo normal vertical sobre el espécimen, cuando la falla ocurre, es conocido como la resistencia a la compresión simple o resistencia a la compresión no confinada. (Osinergmin, 2017)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la investigación

3.1.1. Ubicación geográfica

El Proyecto Subterráneo Chaquicocha, está ubicado debajo de los muros altos sur y oeste del tajo abierto Chaquicocha, que pertenece a minera Yanacocha, su zona principal de operaciones está a 45 km al norte del distrito de Cajamarca, con una altitud de entre los 3 500 a 4 100 msnm, en la provincia y departamento de Cajamarca (ver anexo N° 1). El portal de ingreso hacia el proyecto es por el nivel 3750 (zona donde se ha desarrollado esta investigación).

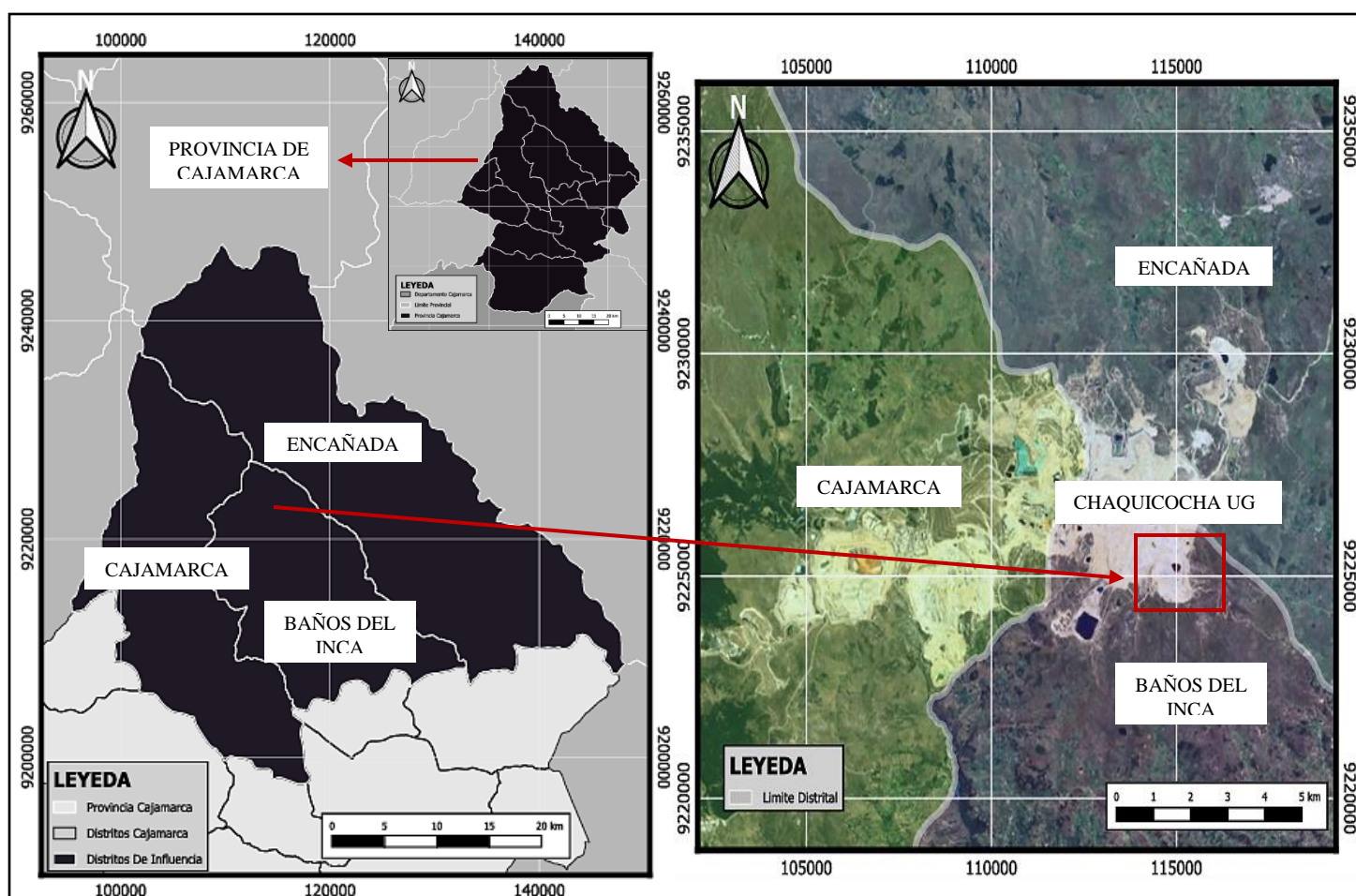


Figura 1. Ubicación geográfica de la investigación
Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Accesibilidad

El acceso al proyecto Chaquicocha Subterráneo es por vía terrestre, desde la ciudad de Cajamarca, está a 50 km por la carretera Cajamarca – Bambamarca, el tiempo de viaje en vehículo es de aproximadamente 1:30 min, su centro geográfico comprende las siguientes coordenadas en el sistema UTM: 774 260 E, 9 227 050 N. El acceso al área de estudio es exclusivo del personal que se encuentra laborando dentro de la mina (**ver anexo N°2**).

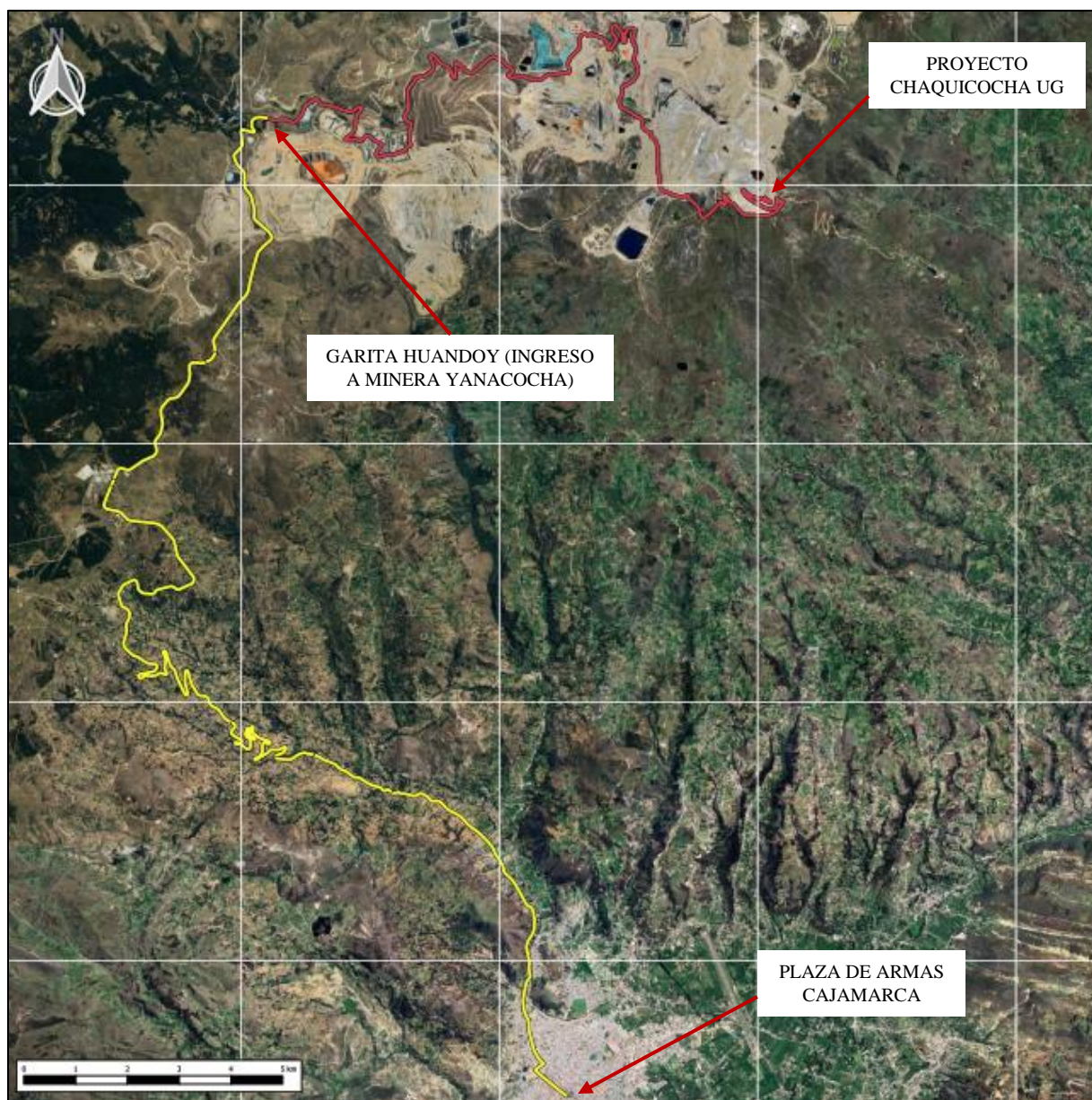


Figura 2. Accesibilidad al Proyecto Chaquicocha Subterráneo
Fuente: Elaboración propia

3.2. Metodología de la investigación

3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación

La investigación es cuantitativo explicativo de nivel correlacional por que busca medir los efectos, las causas de los eventos, sucesos y busca hallar la relación entre variables (Vara, 2012).

El diseño de investigación es experimental – transversal, ya que se llevó a cabo las pruebas in situ, para analizar y determinar los beneficios que nos brinda el nuevo método utilizando el grouting, pernos con fibra de vidrio, pernos de barra hueca y shotcrete que mejorara la estabilidad del túnel Chaquicocha en el nivel 3750.

El método de investigación utilizado es deductivo- inductivo, partiendo el área a investigar de lo general a lo específico embarcando las sostenibilidades del túnel para mejorar la estabilidad del nivel 3750. Asimismo, también utilizando el método descriptivo, este método permite describir el sostenimiento actual utilizado en el túnel asimismo proponer un nuevo método. (Rodríguez & Pérez, 2017)

3.2.2. Población de estudio

Túnel de Chaquicocha UG en el nivel 3750 – Cajamarca

3.2.3. Muestra

Trabajos de implementación del nuevo método de sostenimiento en el nivel 3750 Rampa, 3750 Sur y 3750 Norte.

3.2.4. Unidad de análisis

Geoestructuras, geomecánica, sostenibilidad y estabilidad

3.2.5. Definición de variables

3.2.5.1. Variable dependiente

Método de sostenimiento: Se refiere a las técnicas utilizadas para garantizar la seguridad de las excavaciones subterráneas, como túneles y galerías, durante las operaciones mineras. Estas prácticas son esenciales para prevenir colapsos y accidentes, protegiendo a los trabajadores y los recursos.

3.2.5.2. Variable independiente

Estabilidad: La estabilidad en minería es esencial para garantizar operaciones seguras y sostenibles, protegiendo tanto a las personas como a los recursos explotados.

Tabla 11. Operacionalización de variables

Tipos de variable	Variables	Definición conceptual	Indicadores
Independiente	Método de Sostenimiento	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.	Activo Pasivo
Dependiente	Estabilidad	Es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores, la continuidad de las operaciones y la protección de los recursos mineros.	Factor de seguridad Inestabilidad

3.3. Técnicas y de recolección de datos

El proyecto Chaquicocha Subterráneo inicio sus operaciones en el año 2015 pero se detuvo en el año 2020 debido al COVID-19 y al estado del proyecto. Las inspecciones realizadas por el equipo geotécnico subterráneo en el año 2022 y 2023, tiempo en que se desarrolló esta investigación, encontraron que gran parte del sostenimiento, en este caso la malla electrosoldada, los pernos de fricción (Split set) estaban severamente corroídos y se encontró compuestos sulfuros acumulándose visiblemente en el shotcrete (hormigón proyectado).

Se sospecha que gran parte del sostenimiento existente está severamente degradado, pero las inspecciones de seguimiento han sido difíciles de realizar debido a los cierres temporales del proyecto Chaquicocha UG. Sin embargo, el shotcrete existente está intacto y se observó poca o ninguna grieta durante las inspecciones.

3.3.1. Técnicas

Observación directa: Para la recolección de información sobre el sostenimiento existente en el proyecto Chaquicocha se realizó mediante la observación directa in situ, se hizo múltiples inspecciones y se tomaron fotos de las áreas afectadas.

Ensayos de laboratorio: Para obtener información respecto al rendimiento de los elementos del sostenimiento instalado en el túnel del nivel 3750 Chaquicocha.

Análisis documental: Para la revisión de información bibliográfica como libros, revistas, tesis e informes referidos al tema de investigación. También se tomó en cuenta, estándares y procedimientos proporcionados por el área de geotécnica del Proyecto Subterráneo Chaquicocha UG.

3.3.2. Recursos, materiales y equipos

- Equipos: Brújula geotécnica, GPS, Estación total, cámara fotográfica, martillo de geólogo, lupa, flexómetro, linterna, laptop, colores y lápices, libreta de campo, moldes para paneles, equipos de protección personal.
- Materiales: planos (Geológicos, topográfico, satelitales), fichas y formatos de datos.
- Máquina de arranque de Pernos (ENERPAC): Para realizar ensayos de tracción en pernos instalados, máquina para ensayos de resistencia a la comprensión del Shotcrete.

3.4. Generalidades del Proyecto Subterráneo Chaquicocha UG

3.4.1. Antecedentes Generales

El Proyecto Subterráneo Chaquicocha, como mencioné anteriormente, está ubicado debajo de los muros altos sur y oeste del tajo abierto de Chaquicocha, perteneciente a Minera Yanacocha. El diseño actual de la mina divide la mina entre zonas que albergan material de óxido (Zona Sur) y zonas que albergan material de sulfuro (Zonas Central y Principal).

Los métodos de explotación propuestos para las zonas de óxido y sulfuro difieren: la zona de óxido al sur se explotará mediante corte y relleno, y la zona de sulfuro al norte se explotará mediante taladros largos. La zona de óxido al sur generalmente se puede clasificar como "pobre" en términos de clasificación del macizo rocoso, mientras que la zona de sulfuro al norte generalmente se puede clasificar como "regular" en términos de clasificación del macizo rocoso. La mayor parte de la explotación y el desarrollo se realizarán en la zona de sulfuro.

3.4.2. Ciclo de minado en el Proyecto Chaquicocha UG

El ciclo de minado en el proyecto Chaquicocha UG se divide en doce procesos los cuales son dependientes uno del otro y son los siguientes:

- Marcado de malla de perforación: con la ayuda del láser de la Estación Total y una pértiga se marcan los taladros que se van a perforar.
- Perforación de frente: se procede a perforar los taladros marcados con una maquina llamada Jumbo.
- Carguío con Explosivos: es el proceso de cargar los taladros con explosivos y mechas de seguridad.
- Voladura: consiste en detonar los explosivos de todo el frente de trabajo, mediante un aparato a control remoto.
- Ventilación: se provee de oxígeno mediante una manga de ventilación a la carga de mineral que ha sido detonada, aproximadamente 1 hora.
- Regado de carga: se riega con agua, la carga aproximadamente 15 minutos.
- Desate Mecanizado: consiste en retirar las rocas sueltas del techo y las cajas con un equipo llamado Scailer.
- Limpieza con Scoop: se extrae la carga de mineral del frente de trabajo con el equipo minero Scoop.
- Aplicación de Concreto 2”: consiste en lanzar shotcrete al techo y las cajas del túnel que se está trabajando.
- Marcado de malla de sostenimiento: con la ayuda de la Estación Total laser se marca el lugar donde se colocarán pernos de anclaje.
- Sostenimiento malla + pernos: se procede a colocar pernos y malla electrosoldada si la roca lo requiere con un equipo llamado Bolter.
- Aplicación de concreto 2”: se lanzará nuevamente concreto si la roca es de mala calidad, mediante recomendación de RMR.

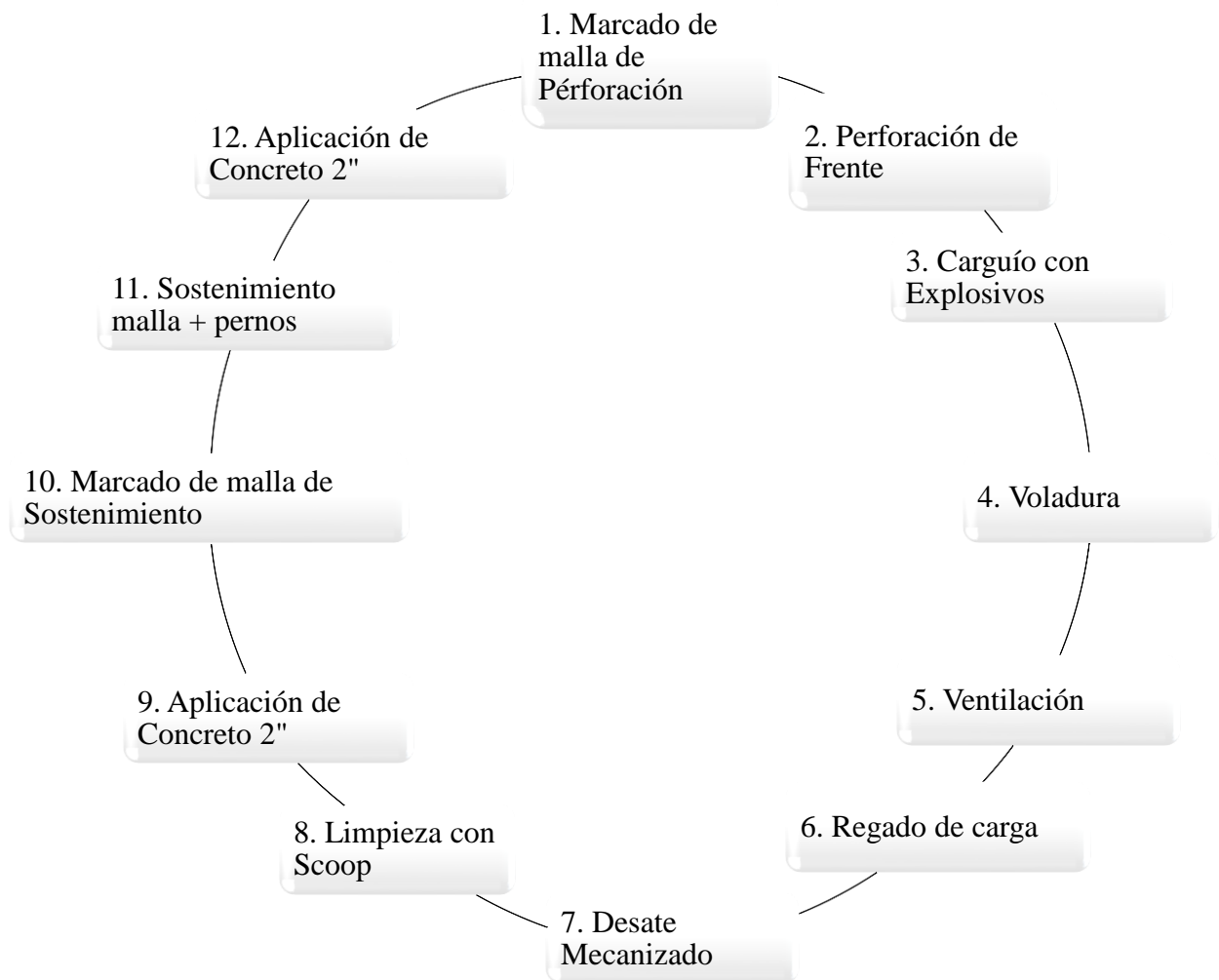


Figura 3. Ciclo de minado en el Proyecto Chaquicocha U.G.

3.4.3. Túnel del Proyecto Chaquicocha UG

El túnel de Chaquicocha actualmente consta de 4,6 km de galería de desarrollo subterránea, con dimensiones nominales de 5 m de ancho x 5,5 m de alto. La entrada principal a la mina es desde el portal 3750 y el ingreso/egreso secundario es posible a través del portal superior 3800. Anteriormente se accedía desde el portal 3632 en la parte inferior del tajo Chaquicocha, sin embargo, la entrada se encuentra actualmente sumergida debido al agua acumulada en el fondo del tajo.

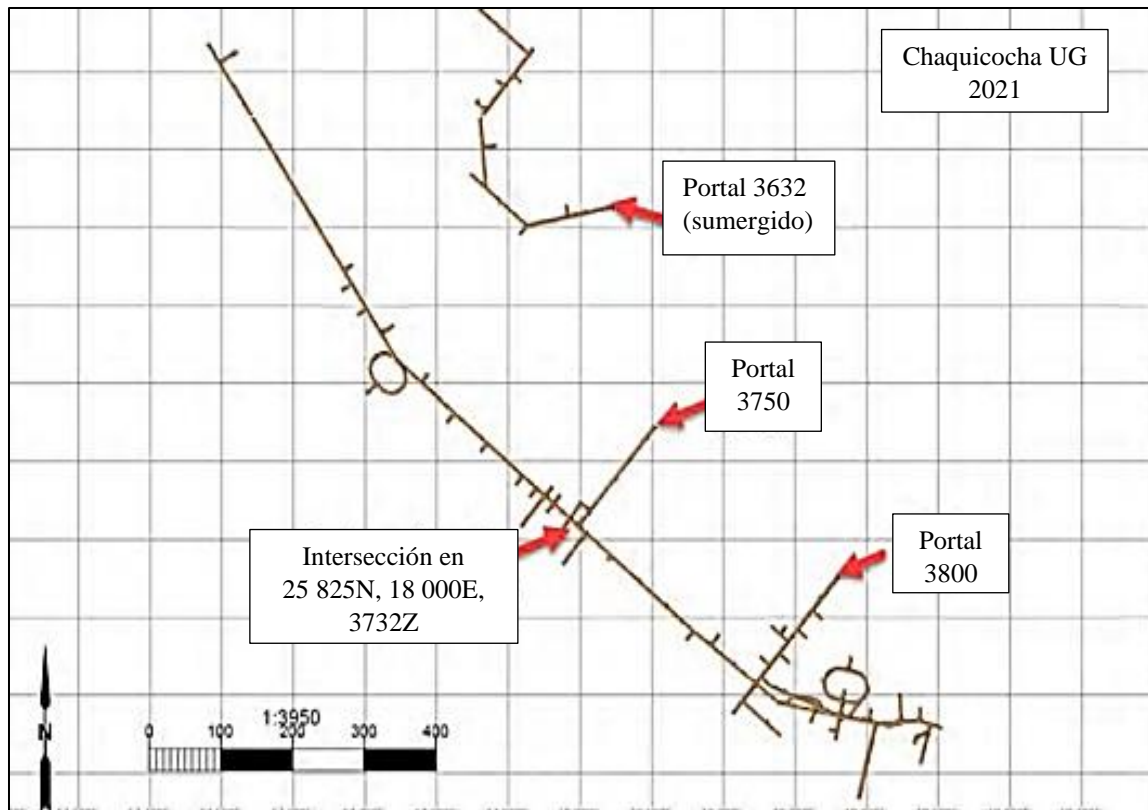


Figura 4. Vista en planta de las labores subterráneas en Chaquicocha año 2021
Fuente: Turner, 2023

La mayoría de los trabajos subterráneos al sur de la intersección en 25,825N, 18,000E, 3732Z (intersección principal entre RP 3750 SW, GA 179 NW y GA 179 SE) se encuentran en terreno Tipo III (condiciones de terreno “aceptables”) y están sostenidos con shotcrete, malla electrosoldada, Split set, Swellex y pernos rebar. Los trabajos que se encuentran al norte de la intersección se encuentran en terreno Tipo II (condiciones de terreno “buenas”) entre PK0+181 y PK0+470 y están sostenidos únicamente con malla electrosoldada, Split set, Swellex y pernos rebar. Los trabajos al norte desde PK0+470 hasta PK1+150 se encuentran en condiciones de terreno Tipo III y Tipo IV (condiciones de terreno “aceptables” y “malas”) y están sostenidos con shotcrete, malla electrosoldada, Split set, Swellex y pernos rebar.

A mediados del año 2022 e inicios del año 2023, el equipo geotécnico subterráneo completo múltiples inspecciones de las obras al sur de la intersección principal en los niveles 3730, 3750,

3770, 3790 y 3810. En junio de 2023, se completó una inspección de las obras al norte de la intersección principal hasta PK1+1030 en la galería 3760. Durante estas inspecciones en los niveles 3730 y 3750 se identificaron evidencia de corrosión severa del sostenimiento debido a la presencia de azufre nativo y sulfuros en la masa rocosa (Figuras 5 – 7). En estas áreas, el equipo geotécnico pudo quitar los pernos a mano de los hastiales (paredes) y se encontraron múltiples cabezas de pernos y placas en el suelo.

Los colgadores y cadenas de servicios utilizados para asegurar los conductos de ventilación también estaban severamente corroídos o habían fallado por la corrosión. En casos donde hay azufre nativo y sulfuros, la categoría geotécnica de riesgo está en el rango de “medio bajo”, donde el sostenimiento está degradado y necesita ser reemplazado, el punto positivo de esta inspección fue que no se identificó ninguna deformación de la masa rocosa.

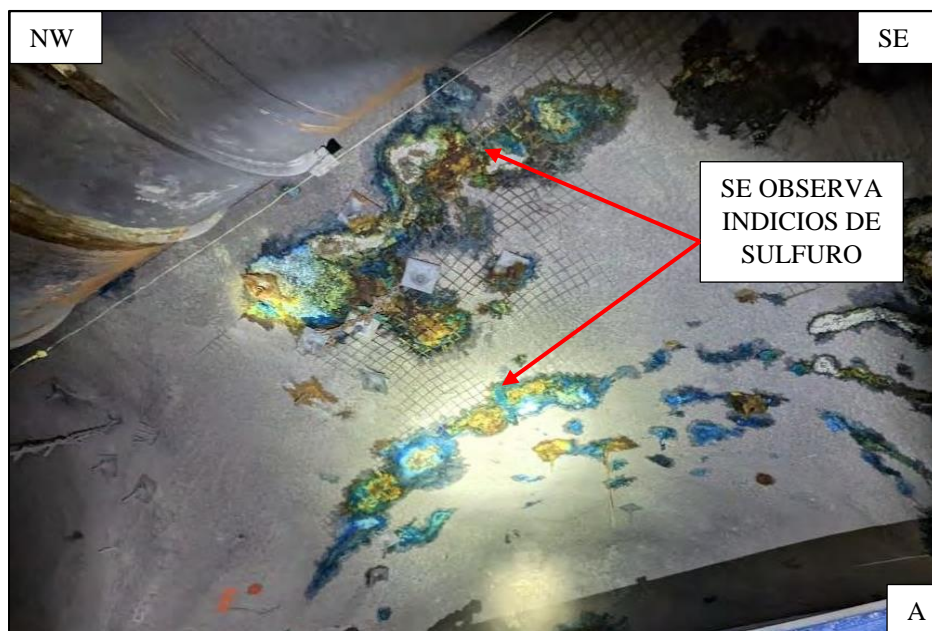


Figura 5. Se puede observar indicios de sulfuro en la parte superior (corona o techo) de la intersección del CX 150 NW y RP 3750 SE en la inspección subterránea del 23 de agosto de 2022
Fuente: Turner, 2023



Figura 6. En la imagen de la parte izquierda se observa una placa corroída en el suelo además de presenciar una coloración anómala en el hastial producto de los sulfuros en el nivel 3730. En la imagen de parte derecha se observa un perno rebar encontrado en el piso durante una inspección en enero de 2023, este perno falló debido a la corrosión.
Fuente: Turner, 2023



Figura 7. En el hastial izquierdo de la PK0+260 en la GA 179 NW del nivel 3732 se puede observar que la malla electrosoldada y el Split set se encuentran corroídos, se presume que están así debido a la composición sulfurosa en el macizo rocoso.
Fuente: Turner, 2023

Después de realizar las primeras inspecciones del túnel en el año 2022 hechas por el equipo geotécnico subterráneo, se determinó que era necesario un nuevo estándar de sostenimiento debido a la degradación y corrosión del sostenimiento ejecutado anteriormente en el túnel de Chaquicocha. A partir del tercer trimestre del año 2023, el contratista minero AESA Redpath Mining (ARM) ejecuto un programa de rehabilitación limitada del sostenimiento en zonas afectadas por sulfuros para reemplazar el sostenimiento degradado en las labores de los niveles 3730 y 3750. Para lo cual se analizó las propiedades del macizo rocoso, los tipos de alteración y clasificación de riesgos por contenido de azufre en una posible o probable ignición de polvos.

3.4.4. Propiedades del Macizo Rocosó en Chaquicocha UG

Según Basson (2018), AMC (2022) y Watson (2022); en sus informes internos dirigidos a Minera Yanacocha nos dicen que las propiedades del macizo rocoso en Chaquicocha se define por los tres tipos principales de alteración: Sílica Masiva (SM), la unidad de alteración más competente que se encuentra principalmente en las Zonas Principal y Central, y contiene la mayoría de la mineralización de sulfuro; Sílica Vuggy (SV), unidad de alteración intermedia en términos de resistencia, la menos abundante de las tres unidades de alteración y que se encuentra en contactos con SM; Sílica Granular (SG), la unidad de alteración más débil donde SG se subdivide en SG2 (menos alterado) y SG3 (material altamente alterado), y se encuentra en los niveles superiores de la Zona Principal y dentro de la Zona Sur.

La mayoría de las pruebas de roca se realizaron en 2018 y poco se ha completado desde entonces. Las pruebas de roca probaron predominantemente la unidad de alteración SM, porque las unidades de alteración SG suelen ser demasiado débiles para recuperar una muestra intacta para la prueba. Es necesario realizar más pruebas de rocas para caracterizar mejor las unidades de SG. Las pruebas de laboratorio de mecánica de rocas se resumen a continuación:

Tabla 12. Resumen de las pruebas de mecánica de rocas para las tres principales unidades de alteración.

Alteración	Valores	Densidad (gr/cm3)	Peso Unitario (MN/m3)	mi	s	Módulo de Young (Gpa)	UCS (Mpa)	Relación de Poisson	Cohesión (Mpa)	Fricción (*)	Tensión (Mpa)	Tracción (Mpa)
SM	mínimo	2.28	0.022	18.268	0.0039	3.902	16.4	0.06	25.7	48.5	6	10.01
	máximo	2.46	0.024	18.268	0.0039	8.006	118.1	0.62	25.7	48.5	12	10.31
	promedio	2.37	0.023	18.27	0.0039	5.59	57.92	0.3	25.7	48.5	6.5	10.16

Alteración	Valores	Densidad (gr/cm3)	Peso Unitario (MN/m3)	mi	s	Módulo de Young (Gpa)	UCS (Mpa)	Relación de Poisson	Cohesión (Mpa)	Fricción (*)	Tensión (Mpa)	Tracción (Mpa)
SG (SG2 & SG3)	Min*	1.46	0.014	5.02	0.004	6.67	10.7	0.31	0.84	24.8	N. D	1.03
	Max**	1.8	0.018	6.13	0.004	7.78	16.6	0.32	1.33	26.4	N. D	3.74
	Prom.	1.63	0.016	5.57	0.004	7.23	13.7	0.32	1.09	25.6	N. D	2.18

*SG3 **SG2 N. D: no data

Alteración	Valores	Densidad (gr/cm3)	Peso Unitario (MN/m3)	mi	s	Módulo de Young (Gpa)	UCS (Mpa)	Relación de Poisson	Cohesión (Mpa)	Fricción (*)	Tensión (Mpa)	Tracción (Mpa)
SV	Min	N. D	-	12.1	0.003	4.4	38.7	0.13	7.1	45.4	N. D	N. D
	Max	N. D	-	17.7	0.003	12.39	54.7	0.33	9.1	50.9	N. D	N. D
	Prom.	N. D	-	14.9	0.003	8.4	46.7	0.23	8.1	48.15	N. D	N. D

Fuente: Turner, 2023

3.4.5. Tipos de alteración en Chaquicocha UG

Sílice masiva, consiste de un cuarzo microcristalino muy denso, entre 10-30um de tamaño, 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 sacaroide, producido por fluidos ácidos (Turner, 2023)

En 2021 Newmont completo modelos de bloques de azufre en Chaquicocha, los modelos indican que la alteración masiva de sílice es la unidad de alteración dominante que alberga un alto contenido de azufre en las Zonas Central y Principal coincidiendo con la mineralización económica de oro y cobre, por ende el desarrollo y la producción futura en Chaquicocha UG enfrentará desafíos en términos de formación de compuestos inflamables debido a la reacción del azufre con metales y condiciones de corrosión debido al alto contenido de azufre.

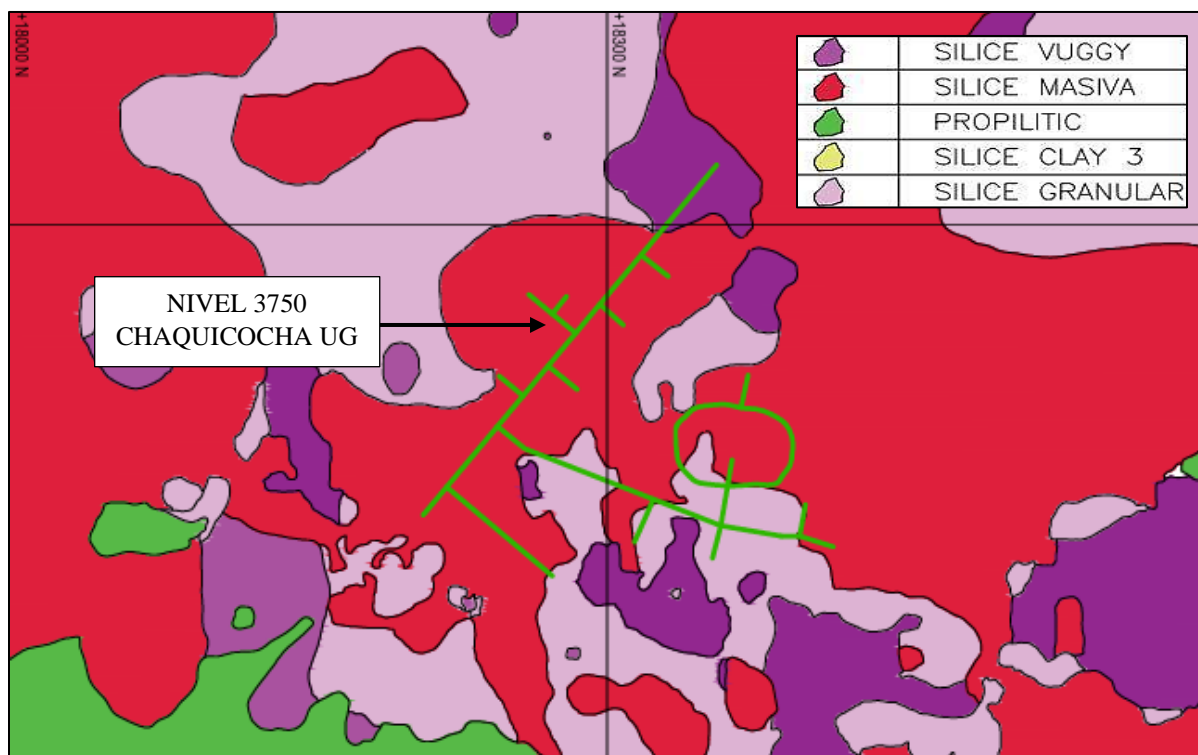


Figura 8. Alteraciones geológicas en Chaquicocha UG – Nv. 3750
Fuente: Turner, 2023

Tabla 13. Clasificación de riesgo por contenido de Azufre, en una posible o probable ignición de polvos en Chaquicocha

Nivel de riesgo	Índice de azufre (contenido total)	Resultado sin Mitigación
Bajo	0-5 %	Es muy poco probable que se produzca una explosión de polvo o incendio
Medio	5-10 %	Es muy probable que se produzca una explosión de polvo o incendio
Alto	10-15 %	Posible explosión de polvo o incendio
Extremo	>15 %	Probable explosión de polvo o incendio

Fuente: Turner, 2023

3.4.6. Clasificación del Macizo Rocoso en Chaquicocha UG

Los datos de registro de perforaciones fueron evaluados por Newmont en términos del índice RQD, índice RMR y Sistema Q para caracterizar el macizo rocoso encontrado en el túnel de Chaquicocha como se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 14. Comparación de RMR y sistema Q en perforaciones registradas en el proyecto Chaquicocha UG

ZONA	METROS LOGEADOS	RMR PORCENTAJE (%)			Q PORCENTAJE (%)		
		25	50	75	25	50	75
Zona Principal	34.524	50	57	63	1.9	4.2	8.3
		regular	regular	buena	pobre	regular	regular
Zona Central	Inferior	28	32	39	0.2	0.3	0.6
		pobre	pobre	pobre	muy pobre	muy pobre	muy pobre
	Superior	34	45	53	0.3	1.1	2.7
		pobre	regular	regular	muy pobre	pobre	pobre
	Inferior y Superior	30	40	50	0.2	0.6	1.9
		pobre	regular	regular	muy pobre	muy pobre	pobre
Área mínima de prueba	2.401	25	35	47	0.1	0.4	1.4
		pobre	pobre	pobre	muy pobre	muy pobre	pobre

Fuente: Turner, 2023

Tabla 15. Comparación de RQD en perforaciones registradas en el proyecto Chaquicocha UG

ZONA		METROS LOGEADOS	RQD PORCENTAJE (%)		
Zona Principal		61.159	25	50	75
			13	38	67
			muy pobre	pobre	regular
Zona Central	Inferior	3.675	3	10	23
	Superior	6.211	muy pobre	muy pobre	muy pobre
			10	23	39
	Inferior y Superior	9.886	muy pobre	muy pobre	pobre
Área mínima de prueba		2.295	0	10	26
			muy pobre	muy pobre	pobre

Fuente: Turner, 2023

3.5. Antiguo método de Sostenimiento en Chaquicocha UG

El sostenimiento utilizado entre 2015 y 2020 se basó en evaluaciones de las condiciones del macizo rocoso mediante el sistema (RMR89). Los elementos de sostenimiento fueron:

- Pernos Swellex de 2.4 m de largo, diámetro de 27 mm; material de PVC recubierto.
- Pernos Super Swellex de PVC recubierto de 3.0 m y 3.6 m de largo, diámetro de 28 mm.
- Shotcrete (concreto lanzado) de 2" con fibra.
- Split Set (perno de fricción) de 8 pies de largo.
- Varilla de refuerzo inyectada (pernos rebar) de 3.0 m y 3.6 m de largo, diámetro de 22 mm; material galvanizado, placa de 15 cm x 15 cm galvanizada, con lechada bombeable (groutting); este tipo de sostenimiento se colocó en las intersecciones.
- Malla de alambre electrosoldada: láminas de 2 m de ancho x 3 m de largo, con rejilla de 3" x 3", de alambre galvanizado n° 8.

El proceso consiste en analizar la condición superficial y la estructura del macizo rocoso para calcular el índice RMR89, luego se propone el tipo de sostenimiento, según el GSI:

TABLA GEOMECÁNICA PARA CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOZO – CHAQUICOCCHA UG													
TABLA GEOMECÁNICA SEGUN GSI		CONDICION SUPERFICIAL (RESISTENCIA)		MUY BUENA (EXTREMADAMENTE RESISTENTE, FRESCA) SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY RUGOSAS E INALTERADAS, CERRADAS. (Rc > 250 MPa) (SE ASTILLA CON GOLPES DE PICOTA)		BUENA (MUY RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA) DISCONTINUIDADES RUGOSAS, LEV. ALTERADA, MANCHAS DE OXIDACION, LIGER. ABIERTA. (Rc 100 A 250 MPa) (SE ROMPE CON VARIOS GOLPES DE PICOTA)		REGULAR (RESISTENTE LEVEMENTE ALTERADA) DISCONTINUIDADES LISAS, MODERADAMENTE ALTERADA, LIGERAMENTE ABIERTAS. (Rc 50 A 100 MPa) (SE ROMPE CON UNO O DOS GOLPES DE PICOTA)		POBRE (MODERADAMENTE RESIT. MODERADAM. ALTER.) SUPERFICIE PULIDA O CON ESTRIACIONES, MUY ALTERADA, RELLENO COMPACTO O CON FRAGMENTOS DE ROCA. (Rc 25 A 50 MPa) - (SE INDENTA SUPERFICIALMENTE)		MUY POBRE (BLANDA, MUY ALTERADA) SUPERFICIE PULIDA Y ESTRIADA, MUY ABIERTA CON RELLENO DE ARCILLAS BLANDAS. (Rc < 25 MPa) (SE DISGREGA O INDENTA PROFUNDAMENTE)	
<div><div>II</div><div>SH 2" (C/F) (Fc 350) + PERNO 8" SISTEMATICO 1.7 A 2 M</div></div> <div><div>III_A</div><div>SH 2" (C/F) (Fc 350) + PERNO 8" SISTEMATICO 1.5 A 1.7 M</div></div> <div><div>III_B</div><div>SH 2" (C/F) (Fc 350) + PERNO 8" SISTEMATICO 1.2 X 1.5 M</div></div> <div><div>IV_A</div><div>SH 2" (C/F) (Fc 350) + MALLA + PERNO 8" SISTEMATICO 1.2 A 1.5 M + SHOT SOBRE MALLA 1" (S/F)</div></div> <div><div>IV_B</div><div>SH 2" 8 C/F) (Fc 350) + MALLA + PERNO 8" SISTEMATICO 1.0 A 1.2 M + SHOT SOBRE MALLA 2" (S/F)</div></div> <div><div>V</div><div>SH 2" (C/F) 8 Fc 350) + CIMBRAS H6 ESPACIADO DE 0.80 A 1.0 M</div></div>		INTERSECCIONES > 9 m.		<div><div>B</div><div>PERNO REBAR 10" SIST 1.5 X 1.5 M</div></div> <div><div>C</div><div>PERNO SIST REBAR 10" SIST 1.5 X 1.5 M</div></div> <div><div>G</div><div>PERNO SIST REBAR 10" SIST 1.5 X 1.5 M</div></div> <div><div>D</div><div>PERNO SIST REBAR 10" 1.2 X 1.2 M</div></div>		NOTA: DE ACUERDO A LA CALIDAD DE ROCA SE COLOCARÁ PERNOS REBAR SPLIT SET O SIBELLE NO SE CONTEMPLA REALIZAR INTERSECCIONES EN TIPO DE ROCA IV-B Y ROCA V		ESTRUCTURA					
		LEVEMENTE FRACTURADA. TRES A MENOS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 75 - 90) (2 A 6 FRACT. POR METRO)				MODERADAMENTE FRACTURADA. MUY BIEN TRABADA, NO DISTURBADA, BLOQUES CUBICOS FORMADOS POR TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES ORTOGONALES. (RQD 50 - 75) (6 A 12 FRACT. POR METRO)				MUY FRACTURADA. MODERADAMENTE TRABADA, PARCIALMENTE DISTURBADA, BLOQUES ANGULOSOS FORMADOS POR CUATRO O MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES. (RQD 25 - 50) (12 A 20 FRACT. POR METRO)			
		INTENSAMENTE FRACTURADA. PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO BLOQUES ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 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 RQD)							

Figura 9. Tabla geomecánica para la clasificación del macizo rocoso - Chaquicocha UG

Fuente: MYSRL, 2021

RECOMENDACIÓN DEL 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 Revlar de 10 pies de forma sistematica espaciadoa 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 Revlar de 10 pies de forma sistematica espaciadoa 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 Revlar de 10 pies de forma sistematica espaciadoa 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 plancas acanaladas topeados con bolsacretos.Previamente colocar Shotcrete 2 pulg con fibra sintetica como pre soporte

Figura 10. Recomendación del antiguo estándar de sostenimiento en Chaquicocha UG
Fuente: MYSRL, 2021

Se revisó este estándar de sostenimiento utilizado entre el año 2015 y 2020, para brindar recomendaciones en el nuevo estándar de sostenimiento en labores tanto permanentes como temporales. El nuevo estándar de sostenimiento recomendado es el siguiente:

- Lanzar shotcrete de 2" donde se utilizó previamente malla metálica soldada o donde el shotcrete existente es fino o esta degradado.
- Instalar pernos de barra hueca de 6.0 m en cada intersección para cumplir un F.S mínimo de 1.5.
- Instalar pernos de fibra de vidrio en roca tipo III y IV donde el sostenimiento existente se haya degradado debido a la corrosión.

En la (figura 11) se muestra la forma en cómo quedaba el estándar de sostenimiento en Chaquicocha UG la cuál incluía shotcrete, Split set y malla electrosoldada, mientras que en la (figura 12) se muestra el estado actual de ese sostenimiento.

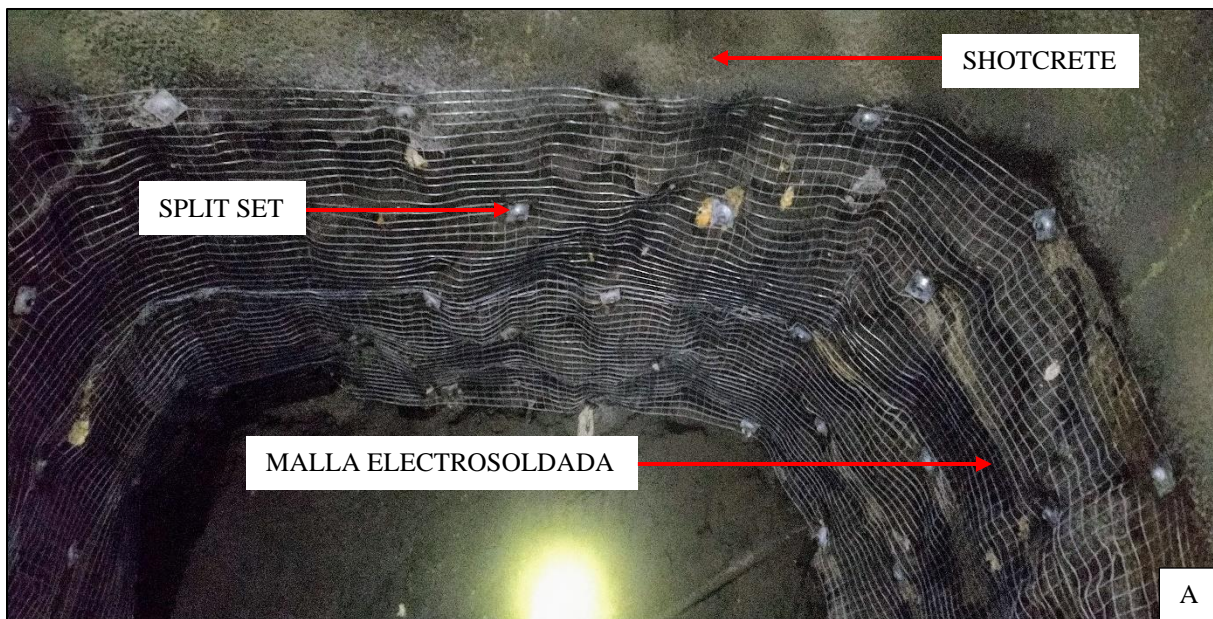


Figura 11. Método de Sostenimiento en Chaquicocha UG entre el año 2015 – 2020

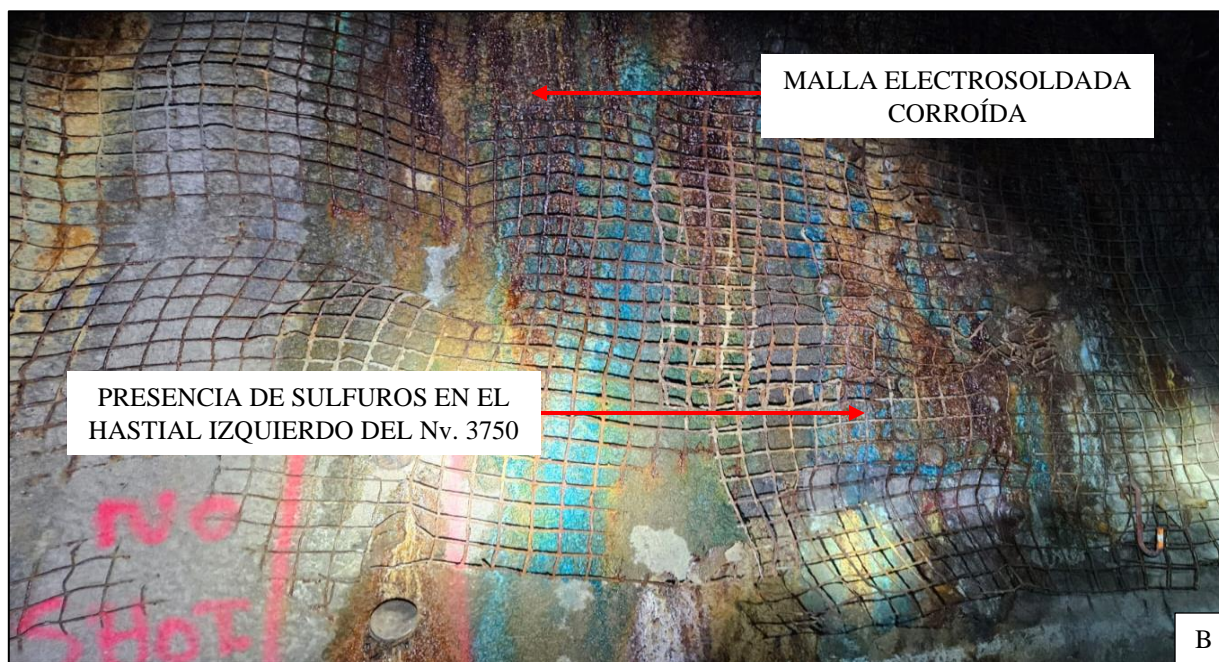


Figura 12. Estado actual del sostenimiento en Chaquicocha UG encontrado en el año 2023, donde se puede ver que está totalmente corroído por la presencia de sulfuros.

3.6. Evaluación geotécnica del Nv. 3750

Los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y las condiciones a lo largo de toda la longitud del nivel 3750 se definieron con la información disponible recolectada por el equipo geotécnico, el cual proporciono una estimación RMR bajo los siguientes criterios:

- 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.

Para la rehabilitación del sostenimiento en Chaquicocha UG, ya se cuenta con información detallada del levantamiento geotécnico y mapeo geoestructural de las discontinuidades (fallas y diaclasas), el cual ha sido determinado por el equipo geotécnico en las etapas anteriores en las que se desarrolló el proyecto y me fue proporcionada para continuar con la investigación en implementación de un nuevo método de sostenimiento en Chaquicocha UG, el trabajo que realice fue ir a campo y validar la información que me fue proporcionada, determinando así la calidad del macizo rocoso, que sirve como herramienta indispensable para proponer el tipo de sostenimiento.

La información recolectada del equipo geotécnico para la clasificación del RMR fue mediante mapeo geotécnico de celdas y líneas de detalle, realizado con flexómetro y brújula Brunton, herramientas necesarias para tomar el buzamiento y dirección del buzamiento (Dip y Dip Direction) en el nivel 3750.

3.6.1. Resistencia de la Roca Intacta

Se obtiene mediante observaciones en el terreno a través del martillo de geólogo y ensayos de resistencia a la carga puntual realizados en laboratorio:

Tabla 16. Ensayos de resistencia a la carga puntual

Fecha	Labor	Progresiva	Promedio UCS (Mpa)	Promedio IS (Mpa)
14/09/2022	RP 3750 SW	0+090	70.27	3.21
15/09/2022	CX 150 NW	0+160	59.43	2.82
21/09/2022	GA 179 NW	0+280	120.51	5.53
22/09/2022	CX 344 SW	0+330	109.33	5.01
07/10/2022	GA 179 SE	0+230	140.01	6.32
08/10/2022	CX 344 NE	0+340	68.23	3.15

3.6.2. Distribución de Discontinuidades

En la figura 13 se muestra la distribución de discontinuidades del nivel 3750 elaboradas en campo por el equipo geotécnico con la brújula Brunton (**Ver Anexo N° 3**):

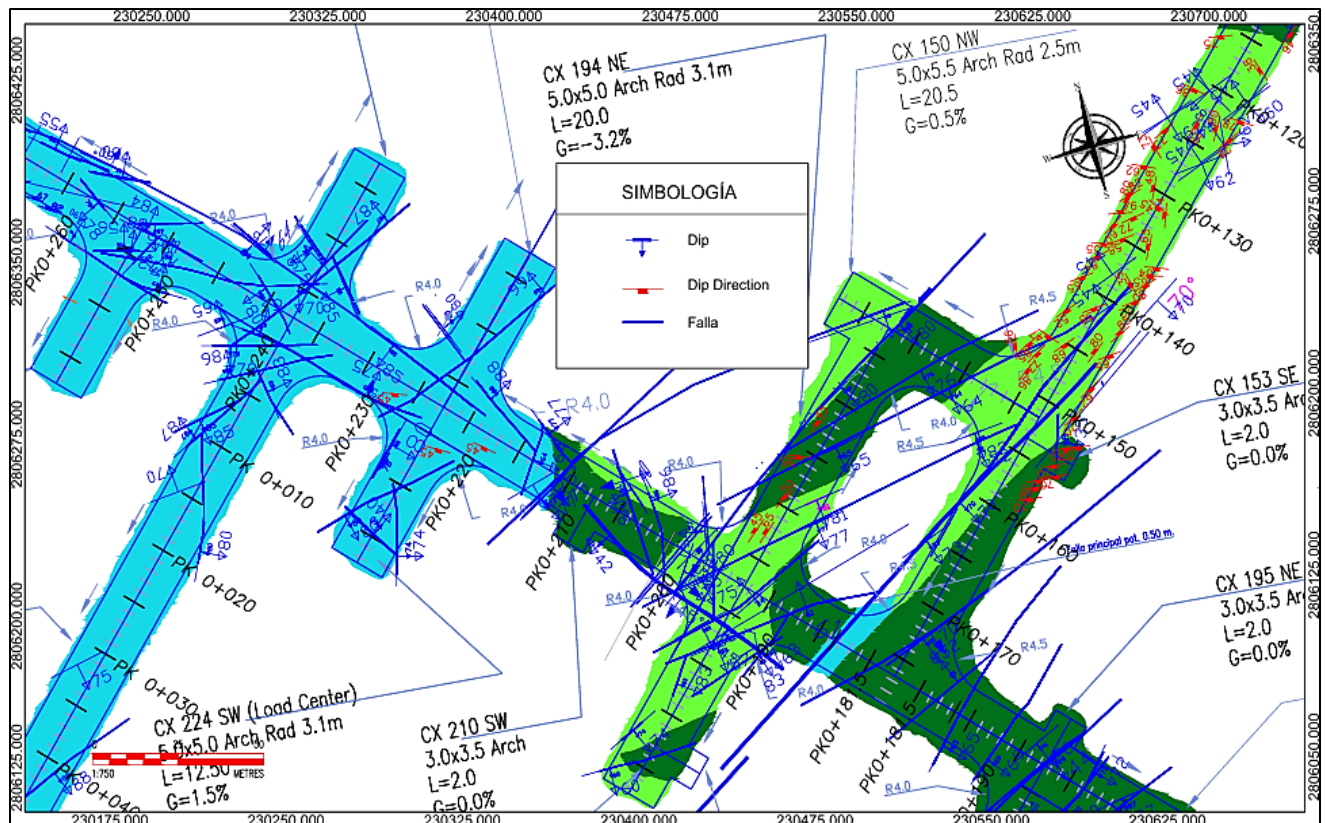


Figura 13. Distribución de Discontinuidades del Nivel 3750

3.6.3. Caracterización geomecánica para determinar el RMR

En la siguiente tabla se muestra el resumen de la caracterización geomecánica del nivel 3750, información recolectada del equipo geotécnico y que fue corroborada para esta investigación en el área de trabajo, de esta forma se logró determinar la calidad del macizo rocoso el cual es necesario para proponer el tipo de sostenimiento. (En el **anexo N° 3** se puede ver la zonificación geomecánica del nivel 3750 según la calidad de roca):

Tabla 17. Caracterización geomecánica del Nivel 3750

Labor	Ubicación	Distancia		Longitud (m)	RMR	Calidad Geotécnica	
		De	A			Calidad	Tipo
3750 RP	RP 3750						
	SW	PK0+009	PK0+173	166	51-60	Regular A	III – A
	CX 150						
	NW	PK0+008	PK0+023	18	41-50	Regular B	III – B
3750 Norte	CX 194						
	NE	PK0+005	PK0+025	20	51-60	Regular A	III – A
	GA 179						
	NW	PK0+184	PK0+285	107	61-80	Buena	II
3750 Sur	GA 179						
	NW	PK0+285	PK0+305	20	31-40	Mala A	IV – A
	GA 179						
	NW	PK0+305	PK0+470	165	61-80	Buena	II
3750 Sur	GA 179						
	SE	PK0+184	PK0+234	56	51-60	Regular A	III – A
	GA 179						
	SE	PK0+234	PK0+250	16	31-40	Mala A	IV – A
	GA 179						
	SE	PK0+250	PK0+290	40	51-60	Regular A	III – A
	GA 179						
	SE	PK0+290	PK0+335	45	31-40	Mala A	IV – A
3750 Sur	GA 179						
	SE	PK0+335	PK0+740	405	41-50	Regular B	III – B
	BP 560						
	NE	PK0+000	PK0+063	63	31-40	Mala A	IV – A

3.7. Nuevo método de Sostenimiento en Chaquicocha UG

Para simplificar el método de sostenimiento y encontrar un procedimiento que se adapte mejor a las condiciones encontradas en Chaquicocha UG, se propuso lo siguiente:

- Utilizar un método de sostenimiento que resista la corrosión y reduzca la cantidad de rehabilitación en el futuro.
- Utilizar pernos que estén completamente encapsulados para resistencia a la corrosión.
- Estandarizar las longitudes de sostenimiento primario y secundario.
- Utilizar el mismo tipo de sostenimiento tanto para el primario y secundario.
- Utilizar productos de lechada o resina que se puedan bombear debido a las malas condiciones del suelo y que se curen lo suficientemente rápido como para permitir que los pernos se postensen en pocos minutos.
- Minimizar el diámetro de los orificios para reducir el consumo de lechada y resina.
- Eliminar el uso de malla electrosoldada y utilizar únicamente shotcrete con fibra.

El sostenimiento se realizará de la siguiente forma: sostenimiento primario cuya función es proporcionar estabilidad al frente de trabajo y al macizo rocoso inmediatamente después de la voladura o después de visualizar la presencia de sulfuros y sostenimiento secundario para proporcionar longevidad a la estructura y una estabilidad permanente a largo plazo.

3.7.1. Sostenimiento Primario

Shotcrete:

- Desincrustar y lavar el techo y las paredes de la excavación en la que se aplicará shotcrete.
- Retirar la malla metálica soldada suelta y asegurar la malla metálica soldada existente.
- Aplicar 50 mm de shotcrete liso donde haya malla metálica soldada y 50 mm de shotcrete donde no haya malla metálica soldada a las paredes y el techo de la excavación.

- En lugares donde el shotcrete existente es demasiado fino se necesitará shotcrete adicional para alcanzar un espesor mínimo de 50 mm.
- Realizar pruebas de control de calidad (pruebas de paneles, resistencia inicial con pistola Hilti, etc.).

Pernos de fibra de vidrio:

- Se utilizó pernos de fibra de vidrio de barra hueca de 2,4 m de largo y 25 mm de diámetro en excavaciones de tipo de roca II y III; pernos de fibra de vidrio de barra hueca de 3 m de largo y 32 mm de diámetro en intersecciones y en excavaciones de tipo de roca IV y V.
- Se realizará pruebas de campo (pull test) para verificar cómo se comportan estos pernos.

Grouting:

- Los pernos de fibra de vidrio se instalan en dos pasadas: primero perforar el orificio luego insertar el perno en el orificio, bombear resina y postensar a 20 kN.
- En tres pasadas: primero perforar el orificio, segundo insertar el perno con la araña (usada para sostener el perno en el orificio), tercero bombear resina y postensar a 20 kN.

3.7.2. Sostenimiento Secundario

Shotcrete:

- Aplicar una segunda capa de shotcrete de 50 mm en tramos donde la roca es Tipo IV y V o donde la excavación lo necesite mediante previa evaluación geomecánica.

Pernos de acero de barra hueca:

- Se utilizó pernos de acero de barra hueca de 6 m de largo y 32 mm de diámetro que se componen de 2 pernos de barra hueca de 3 m de largo acoplados entre sí. Se eligieron estos pernos porque son más adecuados para condiciones de terreno deficientes y porque brindan más resistencia a los cambios en la tensión de corte que los pernos de fibra de vidrio.

Pernos de fibra de vidrio:

- Los pernos de fibra de vidrio de 32 mm tienen mayor resistencia que los pernos de acero (340 kN frente a 280 kN), como resultado, se necesitan menos pernos en grandes tramos de excavación.

Groutting:

Para los pernos de fibra de vidrio que son menos resistentes a los cambios en la tensión de corte que los pernos de acero (90 kN frente a 120 kN), se instalaran:

- En dos pasadas: primero perforar el orificio, luego insertar el perno de 3 m en el orificio, acoplar el segundo perno de 3 m al primer perno, bombear resina y postensar a 20 kN.
- En tres pasadas: primero perforar el orificio, luego insertar el perno de 6 m acoplado con "araña" (usada para sostener el perno en el orificio), finalmente bombear resina y postensar a 20 kN. Debido a que los pernos no se ven afectados por la corrosión, son adecuados para excavaciones en áreas con alto contenido de azufre.

3.7.3. Aplicación del Shotcrete en el sostenimiento

El shotcrete es parte del sostenimiento primario, anteriormente en Chaquicocha UG, se aplicó shotcrete reforzado con fibra de vidrio, en condiciones de terreno tipo III y IV, según el antiguo estándar el shotcrete se aplicaba primero como capa de imprimación, luego como capa final sobre la malla electrosoldada. El nuevo estándar elimina el uso de la malla electrosoldada, para aplicar únicamente una capa de shotcrete, el espesor varía según el tipo de roca. El tipo de cemento que se va a utilizar es de tipo V para tener una mejor resistencia a los sulfatos, con una relación de agua/cemento de 0.30, debido a que ya no se utilizara malla electrosoldada se debe utilizar una dosis correcta de fibra para lograr una resistencia de 35 Mpa.

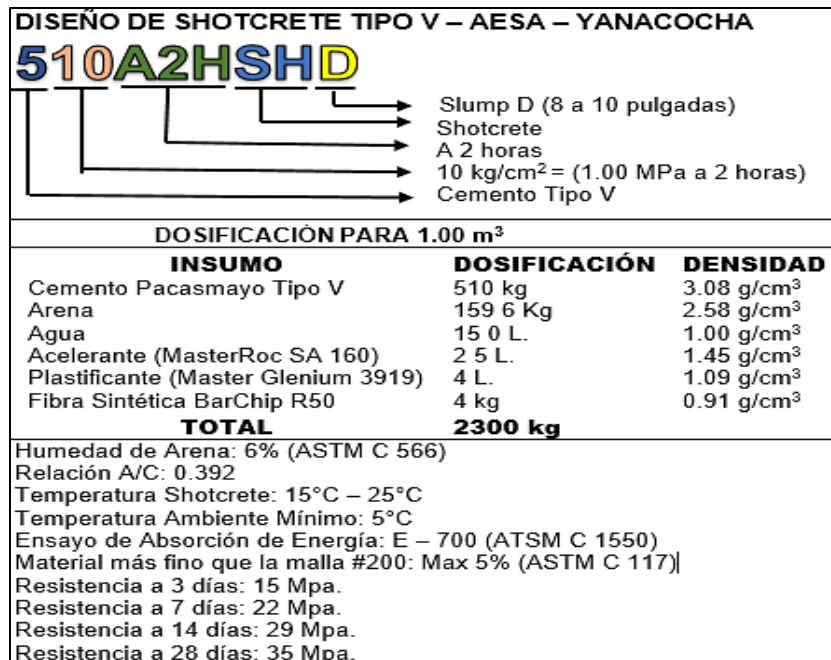


Figura 14. Diseño del Shotcrete tipo V con una relación agua/cemento de 0.30

Es recomendable que el shotcrete siga la curva de resistencia temprana de la Sociedad Austriaca de Hormigón de clase “J2” como se muestra en la figura 14. Por ende, la resistencia inicial del shotcrete en la reinstauración del sostenimiento deberá ser de 1 a 1.5 MPa, en las primeras horas después de ser lanzado y la resistencia final deberá ser de 35 a 40 MPa después de 28 días.

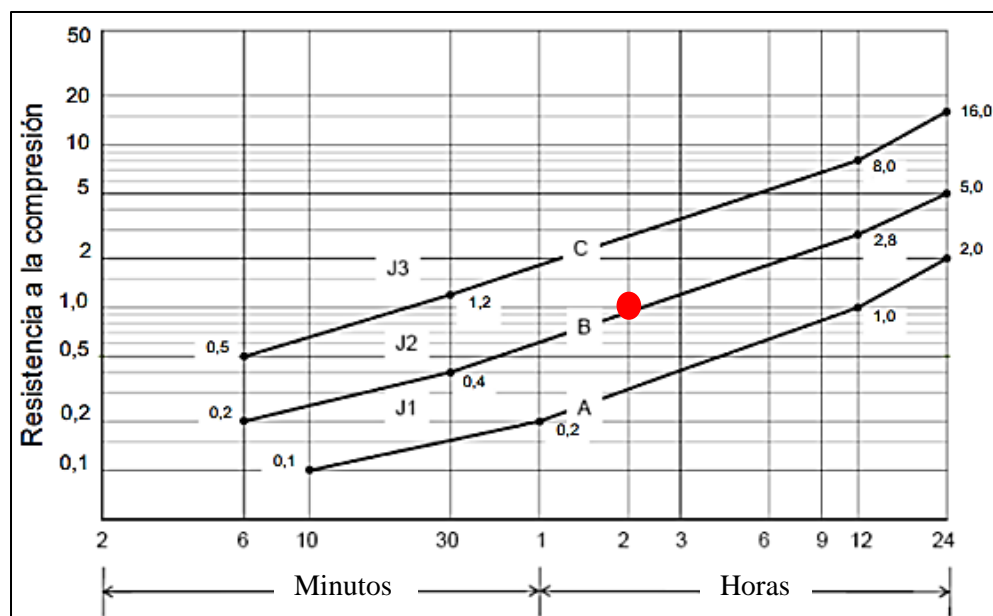


Figura 15. Clases de resistencia inicial para Shotcrete de la Sociedad Austriaca del Hormigón
Fuente: Hilti Corporation, 2021

Tabla 18. Clases de hormigón proyectado de la Sociedad Austriaca del Hormigón

Clases de resistencia del shotcrete	Aplicaciones
J1	Adecuado para aplicación en capas finas sobre soporte seco. No se esperan exigencias estructurales en este tipo de hormigón proyectado durante las primeras horas de su aplicación. Ofrece ventajas de una baja formación de polvo y rebote
J2	Se requiere colocar lo más pronto posible en capas gruesas, además se puede aplicar a terrenos con agua y secciones de revestimiento que impliquen cambios inmediatos de tensión y deformación, como nuevas excavaciones. En la construcción de túneles no se debe superar el J2
J3	Se utiliza para soportar rocas muy frágiles o con una entrada excesiva de agua, debido al alto nivel de polvo y rebote, esta clase se debe utilizar en áreas limitadas

Fuente: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2015

3.7.4. Aplicación de Resina a Granel Bombeable para el sostenimiento

Se seleccionó resina a granel bombeable para reemplazar la lechada de cemento utilizada anteriormente debido a los tiempos superiores de gelificación y curado, además porque las soluciones fabricadas y la mezcla uniforme permite una resistencia y un comportamiento más consistentes. La resina a granel bombeable cuesta casi el doble que la lechada de cemento, pero los tiempos de ciclo mejorados y las instalaciones de pernos pueden anular este costo. Cuando se encuentra un terreno muy fracturado es probable que el consumo de resina aumente, por esta razón es recomendable cambiar a lechada de cemento para reducir costos, los requisitos para la resina a granel bombeable son:

- La bomba de resina debe montarse en un patín portátil o en un empernador/jumbo si es posible.
- Requiere tiempo de gelificación inmediato.
- Los tiempos de postensado deben ser de minutos para que los pernos puedan tensarse mientras el empernador/jumbo está trabajando en el mismo anillo de pernos.

- Se necesitará un adaptador para bombear resina en pernos de acero y fibra de vidrio de barra hueca de 32 mm.
- Poliuretano, resina 1:1, baja viscosidad, tiempo de gelificación lento para penetrar en suelos muy fracturados. Se hincha en presencia de agua.
- Silicato-poliisocianato, tiempo de gelificación/espesamiento inmediato, tiempo de curado rápido. No se hincha y se adhiere a superficies húmedas.

3.8. Evaluación del Sostenimiento en excavaciones

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) del Perú ha definido los Factores de Seguridad (F.S) mínimos para excavaciones subterráneas por tiempo de utilización. Los criterios de Factor de Seguridad son los siguientes:

Tabla 19. Factor de Seguridad de las excavaciones según el tiempo de estabilidad

Factor de Seguridad	Valor	Resistencia de la Excavación	Tiempo Promedio
F. S.	> 1.5	para excavaciones permanentes	> 1 año
F. S.	1.3 - 1.5	para estabilidad a mediano plazo	3 - 12 meses
F. S.	1.1 - 1.3	para estabilidad a corto plazo	< 3 meses

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Newmont ha modificado los criterios de factor de seguridad mínimos (F.S) para el proyecto Chaquicocha UG, el cual viene a ser el siguiente:

Tabla 20. Factor de Seguridad de las excavaciones según el tiempo de estabilidad en el proyecto Chaquicocha U.G

Factor de Seguridad	Valor	Tipo de Excavación	Tiempo Promedio
F. S.	> 1.5	para excavaciones permanentes	> 1 año
F. S.	> 1.5	para circulación de personal por la excavación	> 1 año
F. S.	1.1 - 1.3	para circulación de equipos a control remoto	< 3 meses
F. S.	> 2	para cámaras de refugio, comedores, cruceros, etc.	> 1 año

Fuente: Turner, 2023

3.9. Secuencia de instalación del Nuevo Método de Sostenimiento en el Nv. 3750

La secuencia de instalación del nuevo método de sostenimiento se realizará específicamente en la rehabilitación del nivel 3750 Rampa, nivel 3750 Sur y nivel 3750 Norte (zonas donde han sido afectadas por la corrosión y la alta presencia de sulfuros), su instalación será de la siguiente manera:

3.9.1. Secuencia de instalación en labores de desarrollo

3.9.1.1. Roca tipo III, Calidad “Regular” y RMR > 40

- Después de determinar la calidad geotécnica se debe hacer lo siguiente:
- Aplicar una capa de shotcrete de 50 mm, ascendiendo desde el piso de un hastial, siguiendo por la pared, cruzando la corona hasta terminar en el piso del otro hastial. Aplicar 25 mm de shotcrete en el frente.
- El shotcrete debe traslaparse aproximadamente 0.3 m con el que ha sido colocado en el ciclo anterior, dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente 2 horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instalar pernos de fibra de vidrio de barra hueca (2.4 m de largo y 25 mm de diámetro) en un patrón escalonado de 3.0 m x 1.5 m, a lo largo de cada pared hasta 1 m del piso.
- El sostenimiento debe instalarse a menos de 0.3 m del frente.
- La longitud de avance no debe superar los 4.5 m para un buen sostenimiento.
- Se notificará al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa del terreno y si se realiza alguna modificación será mediante previa evaluación geotécnica.

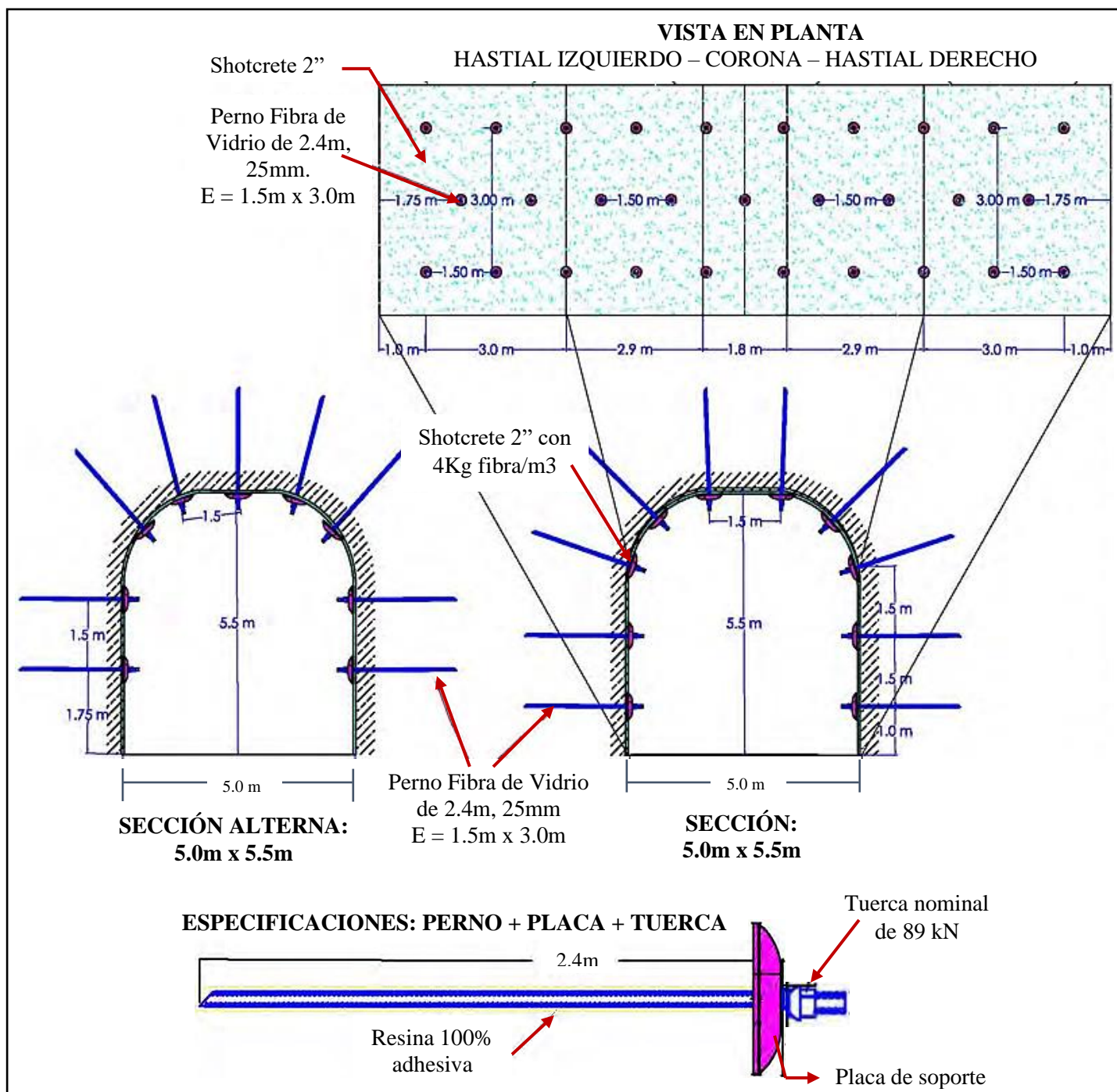


Figura 16. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca Tipo III, Calidad "Regular" y RMR > 40

- Este diseño del sostenimiento se ejecutó en la RP 3750 SW (PK0+009 – PK0+173), CX 150 NW (PK0+008 – PK0+023), CX 194 NE (PK0+005- PK0+025), GA 179 SE (PK0+184 – PK0+234), GA 179 SE (PK0+250 – PK0+290) y GA 179 SE (PK0+335 – PK0+740).

3.9.1.2. Roca tipo III, calidad “Regular”, con soporte secundario y RMR > 40

- Después de determinar la calidad geotécnica, el diseño con soporte secundario se diseñó principalmente para el pilar central de la zona principal RP 3750 SW, CX 150 NW y CX 194 NE, donde se instalarán pernos de 6.0 m como soporte secundario, ya que se proyecta que los frentes de avance aumentarán la tensión en esta zona.
- Aplicar una capa de shotcrete de 50 mm, ascendiendo desde el piso de un hastial, siguiendo por la pared, cruzando la corona hasta terminar en el piso del otro hastial. Aplicar 25 mm de shotcrete en el frente.
- El shotcrete debe traslaparse aproximadamente 0.3 m con el que ha sido colocado en el ciclo anterior, dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente 2 horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instalar pernos de fibra de vidrio de barra hueca (2.4 m de largo y 25 mm de diámetro) en un patrón escalonado de 3.0 m x 1.5 m, a lo largo de cada pared hasta 1 m del piso.
- En el techo (corona) instalar pernos autoperforantes de acero galvanizado o fibra de vidrio (6 m de largo y 32 mm de diámetro) en un patrón escalonado de 3.0 m x 1.2 m.
- El sostenimiento debe instalarse a menos de 0.3 m del frente.
- La longitud de avance no debe superar los 4.5 m para un buen sostenimiento.
- Se debe notificar al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa o cambiante del terreno.
- Cumplir con el sostenimiento indicado y si se realiza alguna modificación será de acuerdo a la evaluación geotécnica.

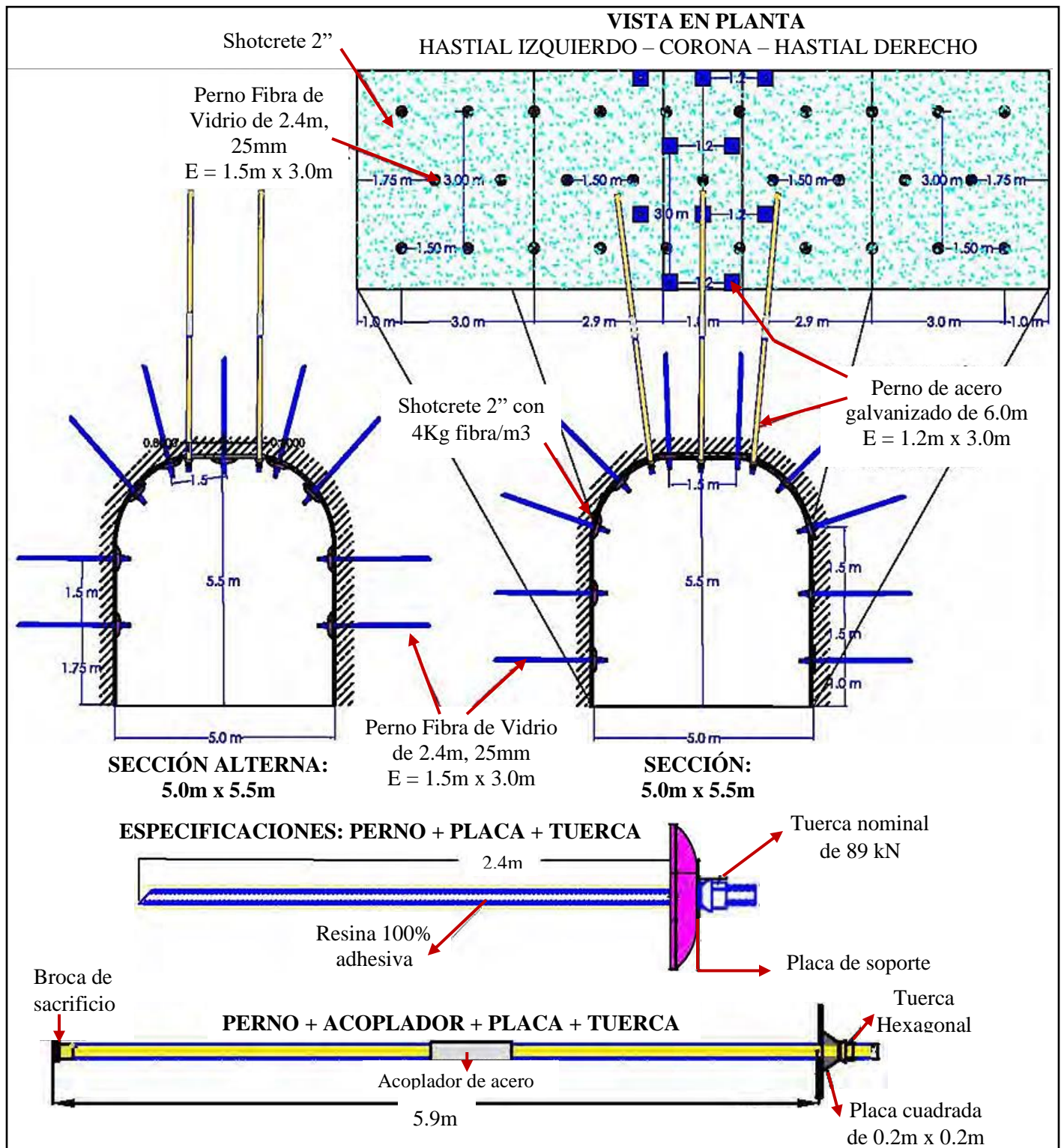


Figura 17. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca Tipo III, Calidad "Regular" con soporte secundario y RMR > 40

- Este diseño del sostenimiento se ejecutó en RP 3750 SW (PK0+009 – PK0+173), CX 150 NW (PK0+008 – PK0+023), CX 194 NE (PK0+005- PK0+025).

3.9.1.3. En Roca tipo IV, calidad “Mala” y RMR entre 21 – 40

- La secuencia de sostenimiento viene a ser de la siguiente manera:
- Aplicar una capa de shotcrete de 100 mm, ascendiendo desde el piso de un hastial, siguiendo por la pared, cruzando la corona hasta terminar en el piso del otro hastial. Aplicar 50 mm de shotcrete en el frente.
- Luego dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente dos horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instalar pernos de fibra de vidrio (3 m de largo y 32 mm de diámetro) en un patrón de 1.0 m x 1.0 m, a lo largo de cada pared (hastial) hasta una distancia de entre 0.5 m y 1.0 m del piso (umbral).
- El sostenimiento debe instalarse a menos de 0.3 m del frente.
- La longitud de avance no debe superar los 3.0 m, para un buen sostenimiento.
- Se debe notificar al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa o cambiante del terreno.
- Cumplir con el sostenimiento indicado y si se realiza alguna modificación será de acuerdo a la evaluación geotécnica.

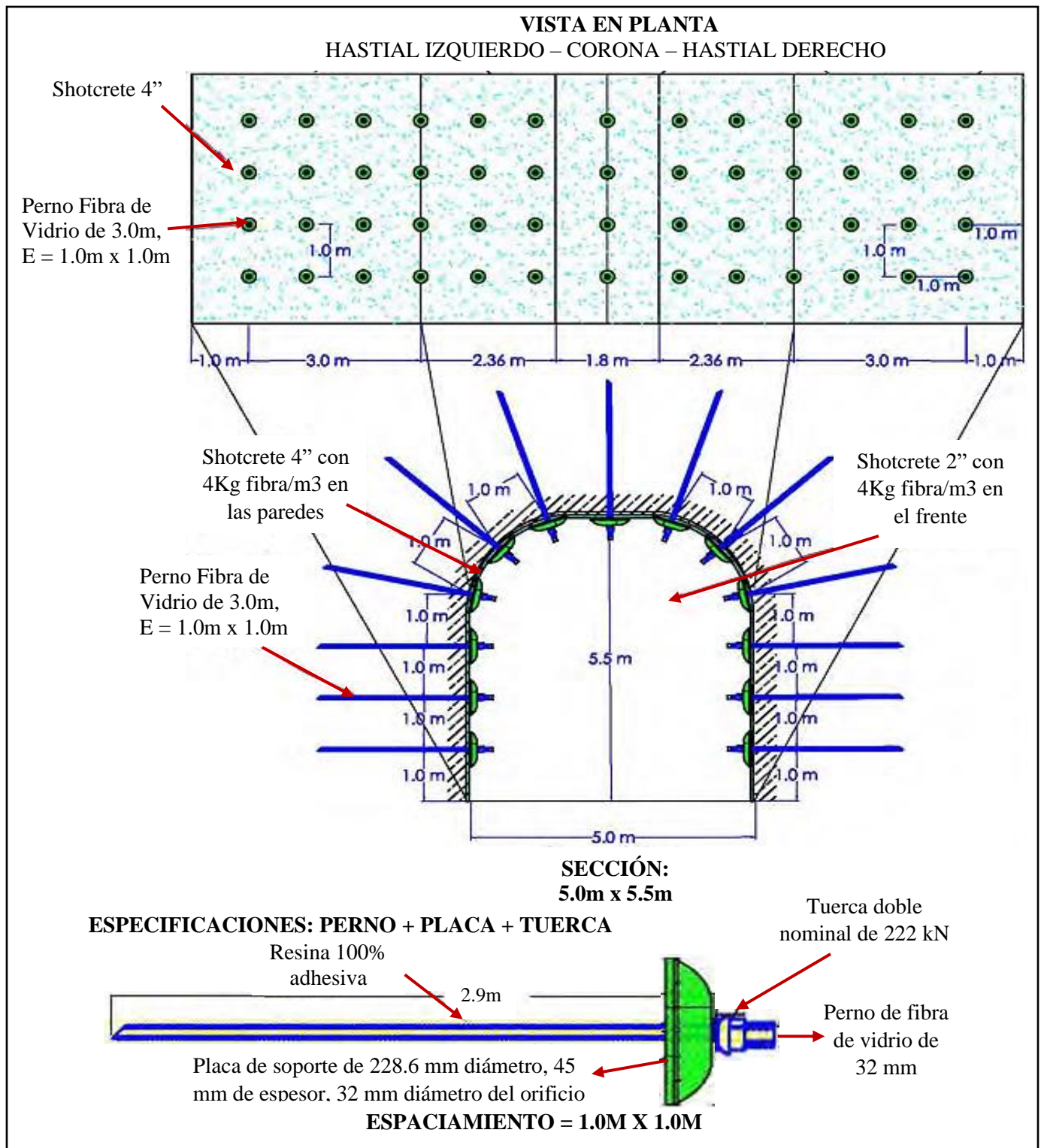


Figura 18. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD para Roca tipo IV, calidad “mala” y RMR 21 – 40

- Este diseño del sostenimiento se ejecutó en GA 179 NW (PK0+285 – PK0+305); GA 179 SE (PK0+23 – PK0+250), (PK0+290 – PK0+335); BP 560 NE (PK0+000 – PK0+063).

3.9.1.4. En Roca tipo V, calidad “Muy Mala” y RMR < 20

- En roca tipo V requiere un diseño personalizado el cuál es modificable en términos de longitud de avance, calidad del macizo rocoso, incluso se puede colocar arcos noruegos.
- Se debe detener 2.0 m antes de llegar al terreno tipo V para aplicar 50 mm de shotcrete en el frente, luego empezando a 0.6 m del piso, instalar tubos de paraguas (6 m de largo y 60 mm de diámetro) con un espacio de 0.6 m alrededor del perímetro del frente, inclinándolos hacia arriba y hacia afuera de 5 a 10°.
- Aplicar una capa de shotcrete de 100 mm comenzando desde el borde del piso de un hastial cruzando el techo hasta llegar al borde del piso del otro hastial. El shotcrete debe traspalarse con las rondas anteriores. Aplicar 50 mm de shotcrete en el frente.
- Dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente dos horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instalar pernos de fibra de vidrio con barras huecas (3 m de largo y 32 mm de diámetro) en un patrón de 1.2 m x 1.2 m, a lo largo de cada pared hasta 1.0 m del piso.
- Instalar pernos autoperforantes de acero (6 m de largo y 32 mm de diámetro, acoplados) en un patrón de 1.2 m x 1.2 m, rellenando los pernos de 3 m.
- La longitud de avance no debe superar los 2.0 m (es preferible el avance mecanizado que las voladuras).
- Se debe notificar al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa o cambiante del terreno.
- Cumplir con el sostenimiento indicado y si se realiza alguna modificación será de acuerdo a la evaluación geotécnica.

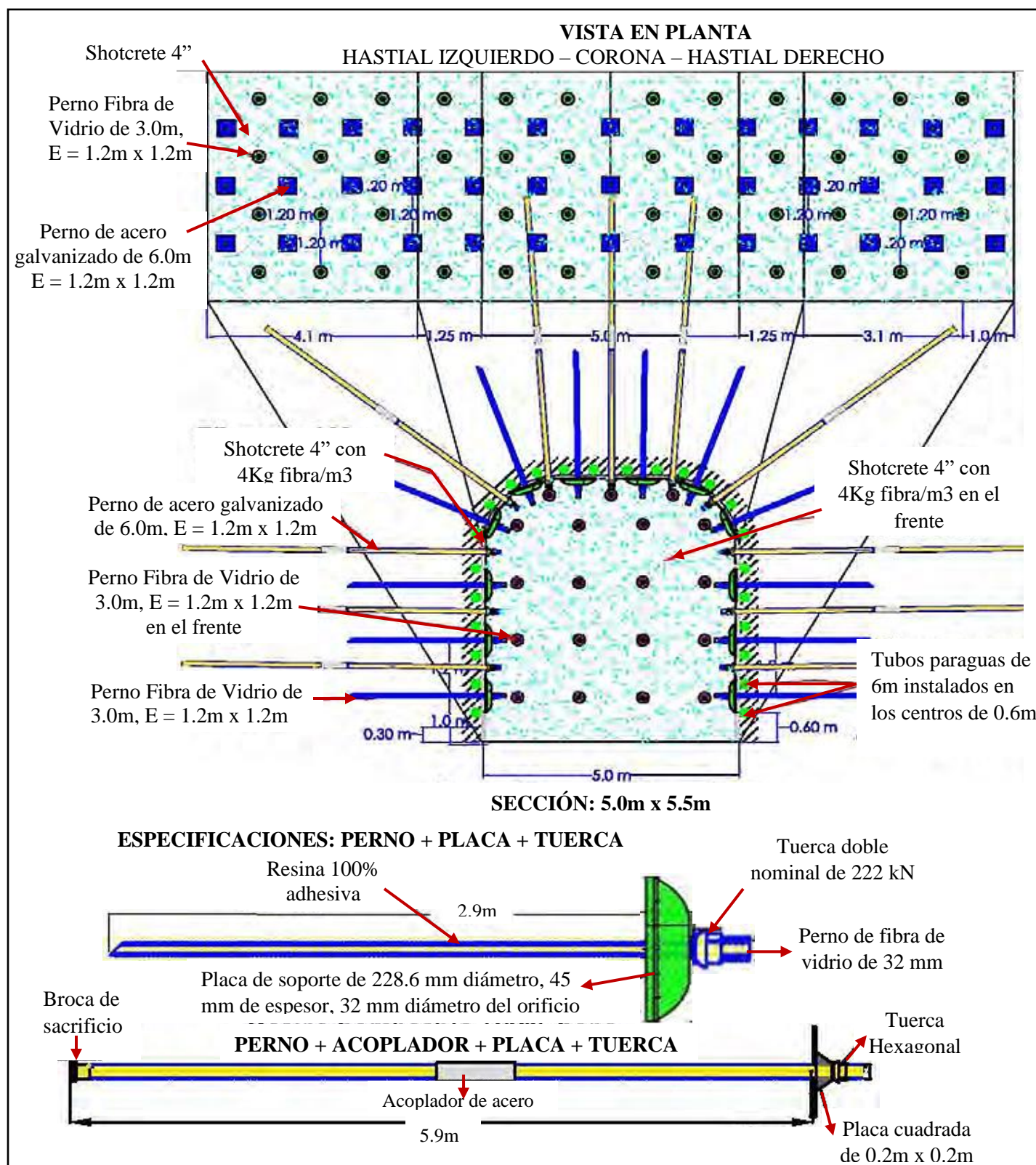


Figura 19. Diseño del sostenimiento en software AutoCAD para Roca tipo V, calidad “muy mala” y RMR < 20

- En el Nivel 3750 no se encontró Roca tipo V, por lo tanto, este diseño no fue ejecutado.

3.9.2. Secuencia de instalación en intersecciones de desarrollo

3.9.2.1. Intersección de 3 vías:

- No es recomendable colocar intersecciones en terrenos Tipo IV o V y en lo posible evitar las intersecciones de 4 vías.
- Aplicar una capa de shotcrete de 50 mm comenzando desde el borde del piso de un hastial cruzando el techo hasta llegar al borde del piso del otro hastial. El shotcrete debe traspalarse con las rondas anteriores. Aplicar 25 mm de shotcrete en el frente.
- Dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente dos horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instale pernos de fibra de vidrio (3 m de largo y 32 mm de diámetro) en un patrón de 1.5 m x 1.5 m en el techo.
- Instale pernos de fibra de vidrio (2.4 m y 25 mm de diámetro) en un patrón escalonado de 1.5 m x 3.0 m en los hastiales hasta 1 m del piso.
- Instale pernos autoperforantes de acero o pernos de fibra de vidrio con barra hueca (6 m de largo y 32 mm de diámetro, acoplados). Los pernos de 3 m y 6 m deben instalarse antes de abrir la intersección hasta el tramo máximo diseñado.
- Se debe notificar al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa o cambiante del terreno.
- Cumplir con el sostenimiento indicado y si se realiza alguna modificación será de acuerdo a la evaluación geotécnica.

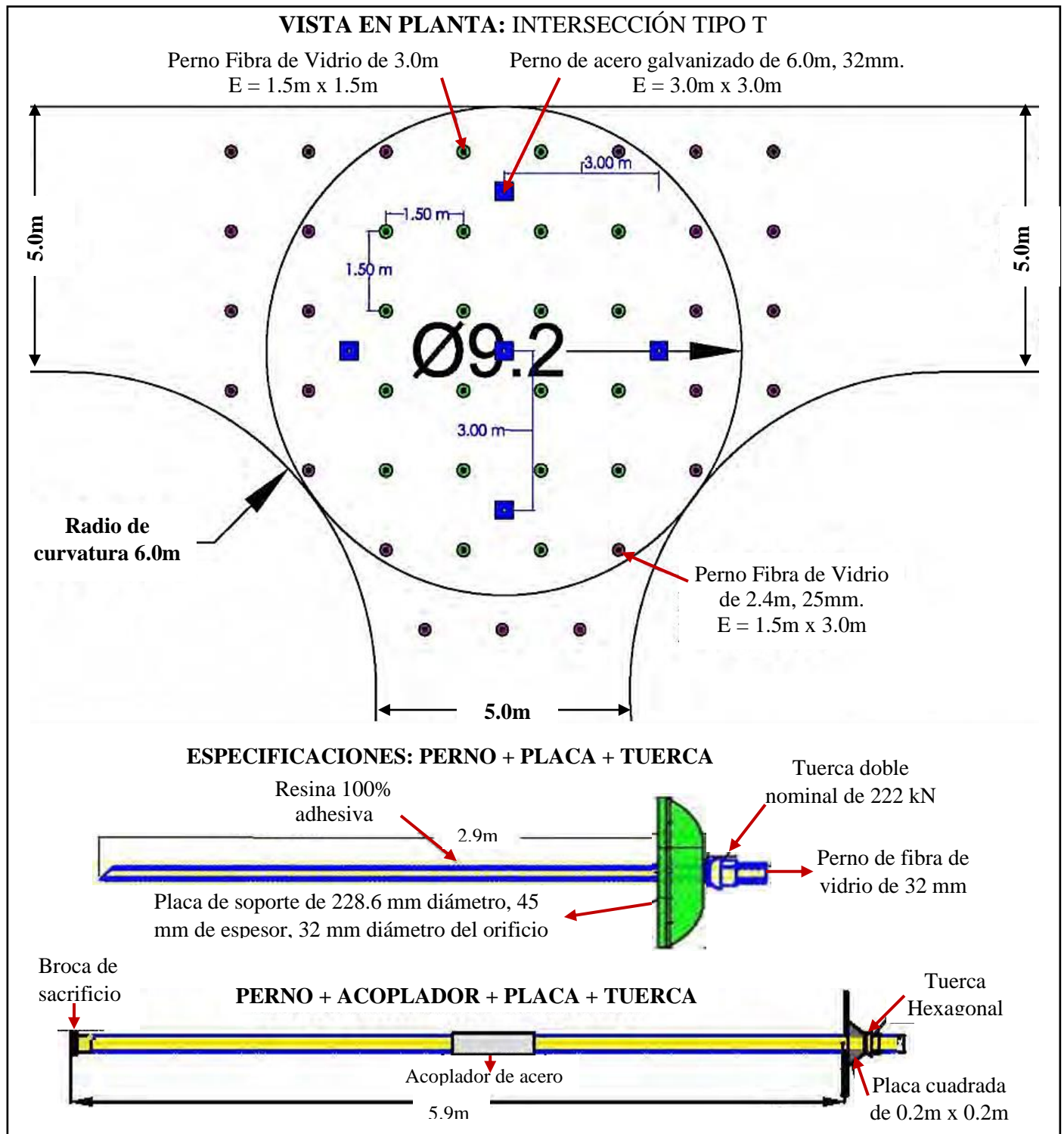


Figura 20. Diseño del sostenimiento con el software AutoCAD en intersección de 3 vías

- Este diseño del sostenimiento se ejecutó en las intersecciones: 3750 RP (2 y 3); 3750 Norte (6N, 7N, 8N, 9N y 10N); 3750 SUR (4S, 5S, 6S, 7S, 8S, 9S y 11S); ver **anexo 5** donde está el plano de sostenimiento en intersecciones con sus códigos.

3.9.2.2. Intersecciones Cruz o de 4 vías:

- Se deben evitar las intersecciones en terrenos de Tipo IV o Tipo V.
- Aplicar una capa de shotcrete de 50 mm comenzando desde el borde del piso de un hastial cruzando el techo hasta llegar al borde del piso del otro hastial. El shotcrete debe traspalarse con las rondas anteriores. Aplicar 25 mm de shotcrete en el frente.
- Dejar que el shotcrete alcance una resistencia inicial de 1.5 MPa (generalmente dos horas) antes de aplicar el sostenimiento con pernos.
- Instale pernos de fibra de vidrio de barra hueca (3 m de largo y 32 mm de diámetro) en un patrón de 1.2 m x 1.2 m en el techo.
- Instale pernos de fibra de vidrio de barra hueca (2.4 m y 25 mm de diámetro) en un patrón escalonado de 1.5 m x 3.0 m en los hastiales hasta 1 m del piso.
- Instale pernos autoperforantes de acero o pernos de fibra de vidrio con barra hueca (6 m de largo y 32 mm de diámetro, acoplados).
- Los pernos de 3 m y 6 m deben instalarse antes de abrir la intersección hasta el tramo máximo diseñado.
- Se debe notificar al equipo geotécnico y a supervisión de cualquier condición adversa o cambiante del terreno.
- Cumplir con el sostenimiento indicado y si se realiza alguna modificación será de acuerdo a la evaluación geotécnica.

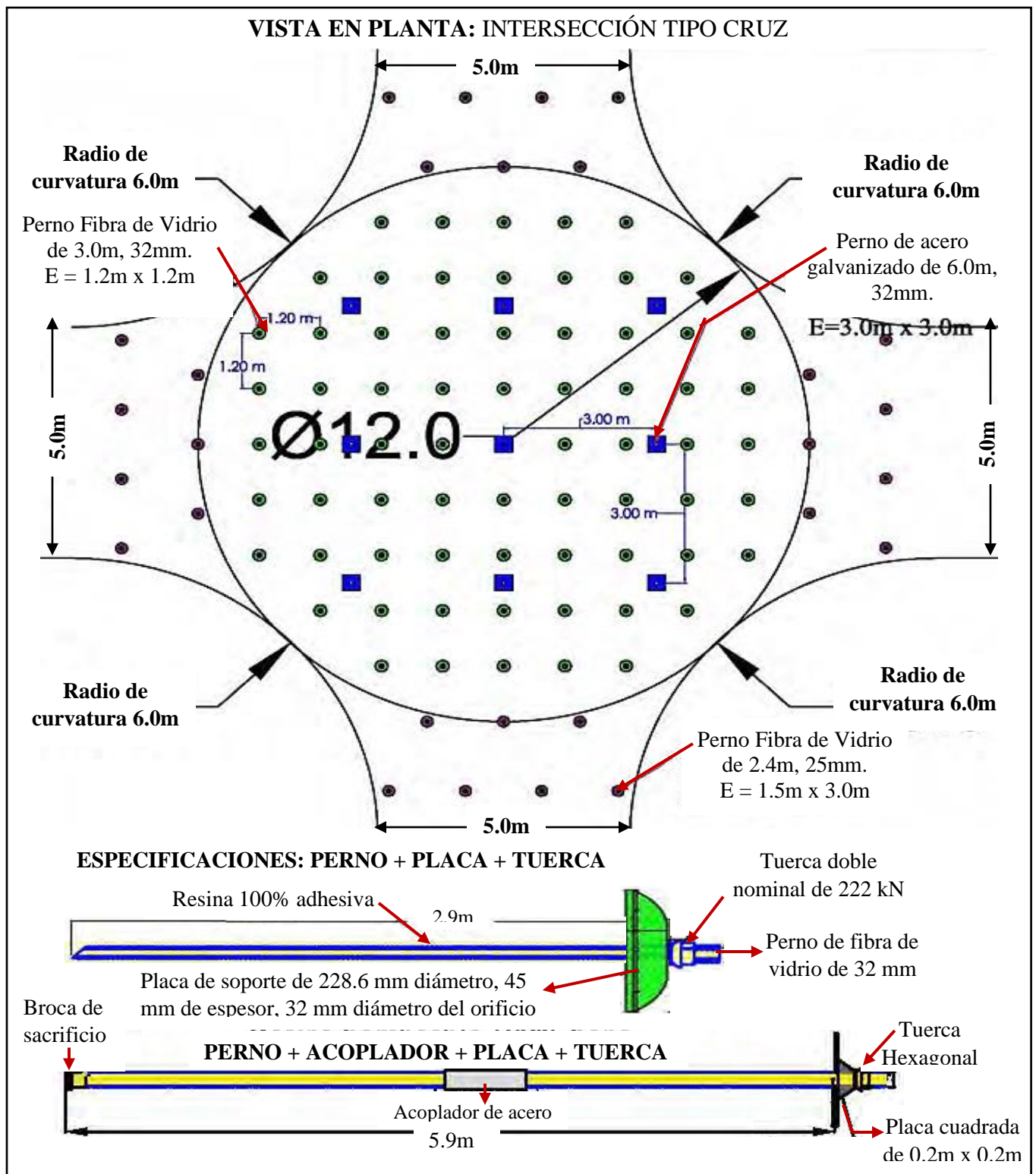


Figura 21. Diseño del sostenimiento en el software AutoCAD en intersección Cruz o de 4 vías

- Este diseño del sostenimiento se ejecutó en las intersecciones: 3750 RP (1); 3750 Norte (3N, 4N y 5N); 3750 SUR (3S y 10S); ver **anexo 5**, para verificar los códigos.

3.10. Cantidad de Shotcrete lanzado en la rehabilitación del sostenimiento

Tabla 21. Cantidad de shotcrete lanzado en la rehabilitación del Nivel 3750

Labor	Prioridad	Sección	Ubicación	Distancia De	A	Longitud m	área m2	Tipo de excavación	Material	Espesor	Volumen m3
RP_3750_SW	1	5.0 m x 5.5 m	3750 Rp	5	45	37	529	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	50
RP_3750_SW	2	5.0 m x 5.5 m	3750 Rp	100	125	25	363	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	34
RP_3750_SW	3	5.0 m x 5.5 m	3750 Rp	135	145	10	145	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	14
RP_3750_SW	4	5.0 m x 5.5 m	3750 Rp	165	173	8	116	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	11
CX 150 NW	5	5.0 m x 5.5 m	3750 "H"	0	9	9	131	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	12
CX 194 NE	6	5.0 m x 5.5 m	3750 "H"	0	19	19	276	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	26
GAL 179 SE	7	9.9 m x 5.5 m	3750 Sur/Norte Inter. principal (3S)	0	15	15	218	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	21
GAL 179 SE	8	5.0 m x 5.5 m	3750 Sur	185	235	50	725	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	69
GAL 179 SE	9	5.0 m x 5.5 m	3750 Sur (solo NE rib)	235	245	10	20	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	2
GAL 179 SE	10	5.0 m x 5.5 m	3750 Sur	245	274	29	421	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	40
GAL 179 SE	11	5.0 m x 5.5 m	3750 Sur (solo NE rib)	280	285	5	5	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	0.5
GAL 179 SE	12	5.0 m x 5.5 m	3750 Sur	335	365	30	435	Drift	Shotcrete (m3)	25 mm	20.7
GAL 179 NW	13	5.0 m x 5.5 m	3750 Norte	185	285	100	1450	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	138
GAL 179 NW	14	5.0 m x 5.5 m	3750 Norte	303	330	27	392	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	37
GAL 179 NW	15	5.0 m x 5.5 m	3750 Norte	358	480	111	1610	Drift	Shotcrete (m3)	50 mm	153
TOTAL						485	6833				628

- En esta tabla se muestra la cantidad de shotcrete lanzado en zonas donde anteriormente no se ha lanzado shotcrete y en zonas donde el shotcrete presenta daños por la corrosión y la presencia de sulfuros.

3.11. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en el Nv. 3750

Tabla 22. Cantidad de Pernos instalados y consumo de resina en la rehabilitación del Nivel 3750

Labor	N° de inter.	Lugar	Excavación (m)	Distancia De A	Longitud (m)	Roca Tipo	Tipo de sostenimiento	Espaciado de pernos	Cantidad de Pernos	Diámetro de broca (mm)	Consumo de resina (Kg)
3750 RP	1	RP 3750 SW	5.0 m x 5.5 m	PK0+009	PK0+173	166	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	1107	31	1515
	2	CX 150 NW	5.0 m x 5.5 m	PK0+008	PK0+023	18	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	120	31	164
	3	CX 194 NE	5.0 m x 5.5 m	PK0+005	PK0+025	20	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	133	31	182
3750 Norte	3N	GA 179 NW	5.0 m x 5.5 m	PK0+184	PK0+285	107	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	714	31	976
	4N	GA 179 NW	5.0 m x 5.5 m	PK0+285	PK0+305	20	Tipo IV Barra hueca de 3.0 m y 32 mm	1.0 m x 1.0 m	260	38	585
	5N	GA 179 NW	5.0 m x 5.5 m	PK0+305	PK0+470	165	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	1101	31	1506
3750 Sur	3S	GA 179 SE	5.0 m x 5.5 m	PK0+184	PK0+234	56	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	374	31	511
	4S	GA 179 SE	5.0 m x 5.5 m	PK0+234	PK0+250	16	Tipo IV Barra hueca de 3.0 m y 32 mm	1.0 m x 1.0 m	208	38	468
	5S	GA 179 SE	5.0 m x 5.5 m	PK0+250	PK0+290	40	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	267	31	365
	6S	GA 179 SE	5.0 m x 5.5 m	PK0+290	PK0+335	45	Tipo IV Barra hueca de 3.0 m y 32 mm	1.0 m x 1.0 m	585	38	1316
	7S	GA 179 SE	5.0 m x 5.5 m	PK0+335	PK0+740	405	Tipo III Barra hueca de 2.4 m y 25 mm	1.5 m x 1.5 m	2701	31	3695
	8S	BP 560 NE	7.0 m x 7.0 m	PK0+000	PK0+063	63	Tipo IV Barra hueca de 3.0 m y 32 mm	1.0 m x 1.0 m	819	31	1843
Total, de Pernos									10 066	Consumo de Resina Kg	13 127

3.12. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en Intersecciones

Tabla 23. Cantidad de Pernos instalados y consumo de Resina en las Intersecciones del Nivel 3750

Labor	N° Inter.	Lugar	Diá. (m)	Distancia De A	RMR	Tipo de Sostenimiento	Espaciado de pernos	Cant. de Pernos	Diámetro de broca (mm)	Consumo de resina (Kg)
3750 RP	1	RP3750SW/CX150NW	10.1	PK0+148 PK0+155	58	Barra hueca 6m y 32mm	3m x 1.5m	15	45	119
	2	GA179NW/GA179SE	10.3	PK0+172 PK0+177	59	Barra hueca 6m y 32mm	3m x 1.5m	15	45	119
	3	CX194NE/CX150NW	8.2	PK0+015 PK0+019	42	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	3N	CX194SW/CX194NE	9.9	PK0+191 PK0+196	42	Barra hueca 6m y 32mm	3m x 1.5m	15	45	119
	4N	CX224SW/CX224NE	10.8	PK0+220 PK0+228	42	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	21	45	166
	5N	CX239SW/CX239NE	11.5	PK0+234 PK0+245	42	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	24	45	190
3750 Norte	6N	GA179NW/CX254SW	9.1	PK0+251 PK0+257	42	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
	7N	GA179NW/279SW	9.6	PK0+277 PK0+283	47	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
	8N	GA179NW/CX344SW	8.5	PK0+342 PK0+346	47	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	9N	GA179NW/CX404SW	8.8	PK0+401 PK0+407	47	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
	10N	GA179NW/CX464NE	7.9	PK0+462 PK0+467	47	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	3S	CX195SW/GA179SE	9.9	PK0+192 PK0+197	54	Barra hueca 6m y 32mm	3m x 1.5m	15	45	119
	4S	CX244SW/GA179SE	8.5	PK0+237 PK0+241	50	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	5S	CX394SW/GA179SE	7.6	PK0+387 PK0+341	51	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	6S	CX420NE/GA179SE	8.3	PK0+418 PK0+422	53	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	9	45	71
	7S	CX500SW/GA179SE	9.2	PK0+497 PK0+503	52	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
3750 Sur	8S	BP560NE/GA179SE	9.4	PK0+550 PK0+555	53	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
	9S	BP560NW/GA179SE	9.3	PK0+600 PK0+606	53	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	12	45	95
	10S	CX627SW/CX627NE	11.7	PK0+622 PK0+632	57	Barra hueca 6m y 32mm	2m x 2m	28	45	222
	11S	CX732NE/RP648NE	9.8	PK0+729 PK0+735	50	Barra hueca 6m y 32mm	3m x 1.5m	15	45	119
Total, de Pernos								329	Consumo de Resina	2170

- En la tabla 22 y 23 se muestra la cantidad total de pernos instalados y el consumo de resina en la rehabilitación del Nivel 3750, colocados mediante previa evaluación geotécnica del macizo rocoso.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Calidad del macizo rocoso del Nv. 3750

La calidad del macizo rocoso se determinó mediante clasificaciones geomecánicas de RMR teniendo como resultados predominantes roca tipo III – A (calidad regular A), roca tipo IV – A (calidad mala A) y en menor proporción roca tipo III – B (calidad regular B), roca tipo II (calidad buena), información necesaria para proponer el tipo de sostenimiento, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 24. Clasificaciones geomecánicas RMR en el Nv. 3750

Labor	Ubicación	Distancia		RMR	Calidad Geotécnica		Tipo de sostenimiento propuesto
		De	A		Calidad	Tipo	
3750 RP	RP 3750 SW	PK0+009	PK0+173	51-60	Regular A	III – A	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	CX 150 NW	PK0+008	PK0+023	41-50	Regular B	III – B	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	CX 194 NE	PK0+005	PK0+025	51-60	Regular A	III – A	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	GA 179 NW	PK0+184	PK0+285	61-80	Buena	II	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
3750 Norte	GA 179 NW	PK0+285	PK0+305	31-40	Mala A	IV – A	Barra hueca de 3.0 m y 32 mm
	GA 179 NW	PK0+305	PK0+470	61-80	Buena	II	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	GA 179 SE	PK0+184	PK0+234	51-60	Regular A	III – A	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
3750 Sur	GA 179 SE	PK0+234	PK0+250	31-40	Mala A	IV – A	Barra hueca de 3.0 m y 32 mm
	GA 179 SE	PK0+250	PK0+290	51-60	Regular A	III – A	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	GA 179 SE	PK0+290	PK0+335	31-40	Mala A	IV – A	Barra hueca de 3.0 m y 32 mm
	GA 179 SE	PK0+335	PK0+740	41-50	Regular B	III – B	Barra hueca de 2.4 m y 25 mm
	BP 560 NE	PK0+000	PK0+063	31-40	Mala A	IV – A	Barra hueca de 3.0 m y 32 mm

4.2. Análisis de Estabilidad de Excavaciones en el software de NIOSH

Para verificar que el nuevo método de sostenimiento cumple los criterios del $F.S > 1.5$, el análisis se realizó utilizando la Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte del Terreno, elaborado por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre calcula el factor de seguridad de peso muerto (F.S) para el diseño de soporte terrestre de una excavación minera subterránea, basándose en las entradas del usuario y los métodos descritos por Pakalnis (2008, 2014). Se encuentran disponibles opciones de diseño bidimensional (2D) y tridimensional (cono) para el diseño de galerías e intersecciones, respectivamente.

Se asumió una resistencia de adherencia de 130 kN/m, en pernos de barra hueca de 6.0 m y 32 mm. Para roca Tipo III la norma indica un patrón no escalonado de 1.5 m x 1.5 m, y para roca Tipo IV la norma indica un patrón no escalonado de 1.0 m x 1.0 m. El software está diseñado para refuerzos estáticos de roca (cables y pernos de roca). No tiene en cuenta las deformaciones del terreno ni los mecanismos de carga más complejos. Se debe tener en cuenta que el Shotcrete se excluye en estos análisis.

A continuación, se muestra el análisis en Roca tipo III, Roca tipo III con soporte secundario y el análisis en intersecciones:

4.2.1. Análisis en el software de NIOSH en Roca tipo III

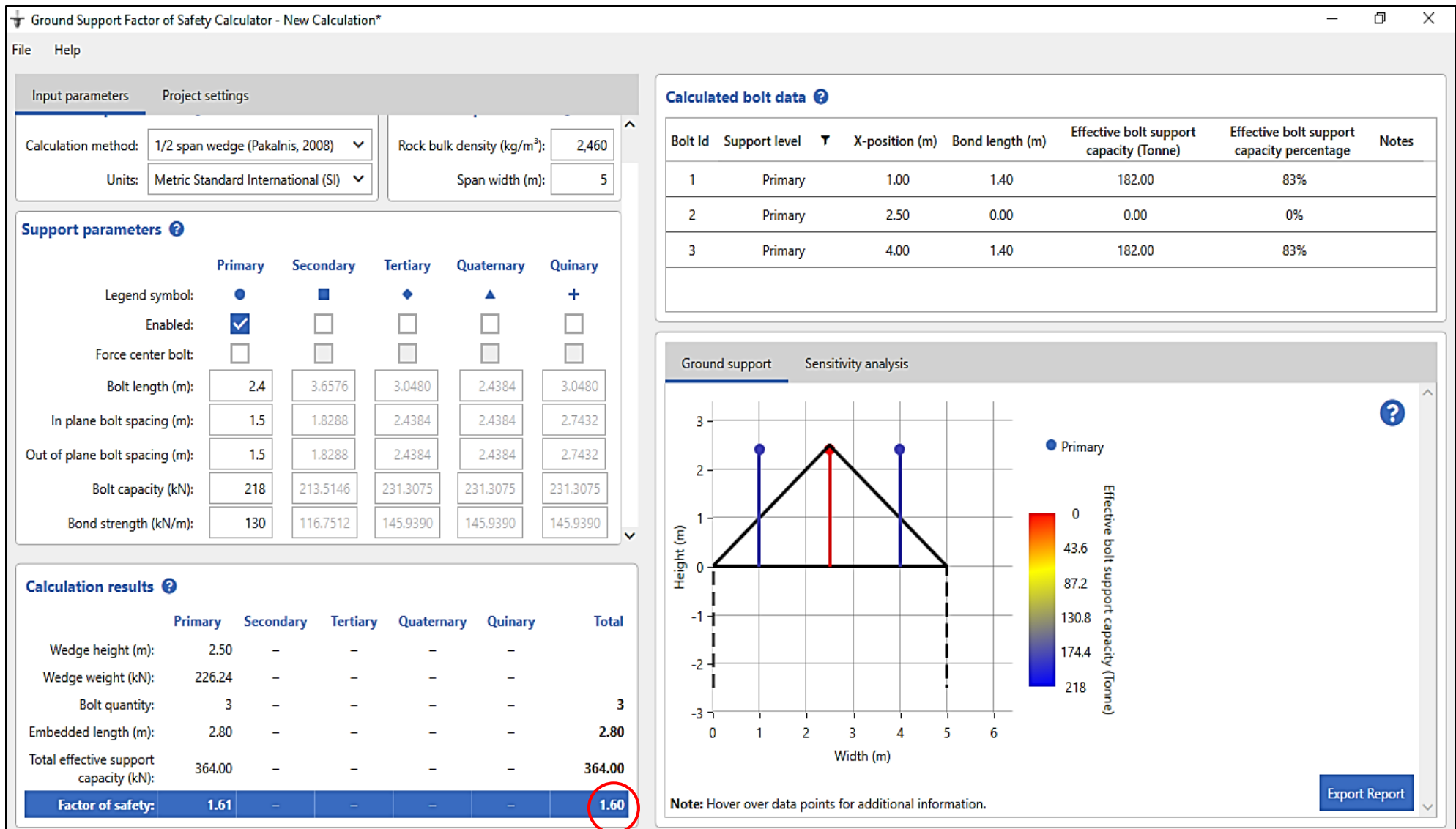


Figura 22. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Roca tipo III

- Utilizando la calculadora de NIOSH para evaluar un tramo de 5.0m, en Roca tipo III, utilizando pernos fibra de vidrio de 2.4m, espaciados en un patrón de 1.5m x 1.5m y la capacidad del perno de 218 kN, se obtiene un F.S de 1.60 lo cual indica que la labor es estable.

4.2.2. Análisis en el software de NIOSH en Roca tipo III con soporte secundario

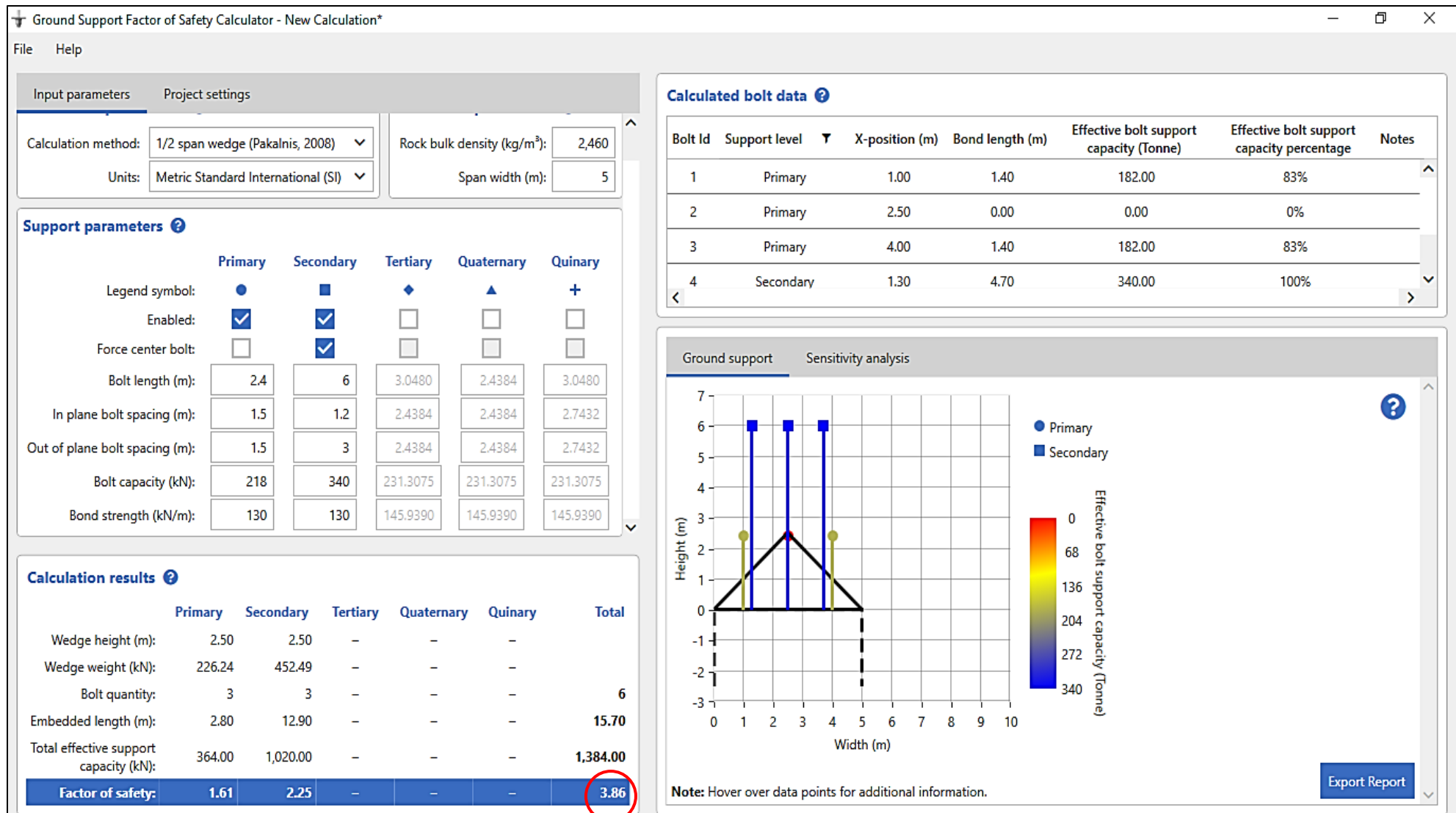


Figura 23. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Roca Tipo III con soporte secundario.

- Utilizando la calculadora de NIOSH para evaluar un tramo de 5.0m, en Roca tipo III con soporte secundario, utilizando pernos fibra de vidrio de 2.4m, espaciados en 1.5m x 1.5m, capacidad del perno de 218 kN; más pernos de acero galvanizado de 6.0m, espaciados en 1.2m x 3.0m, capacidad del perno de 340kN, se obtiene un F.S de 3.86 lo cual indica que la labor es estable y segura.

4.2.3. Análisis en el software de NIOSH en Intersecciones

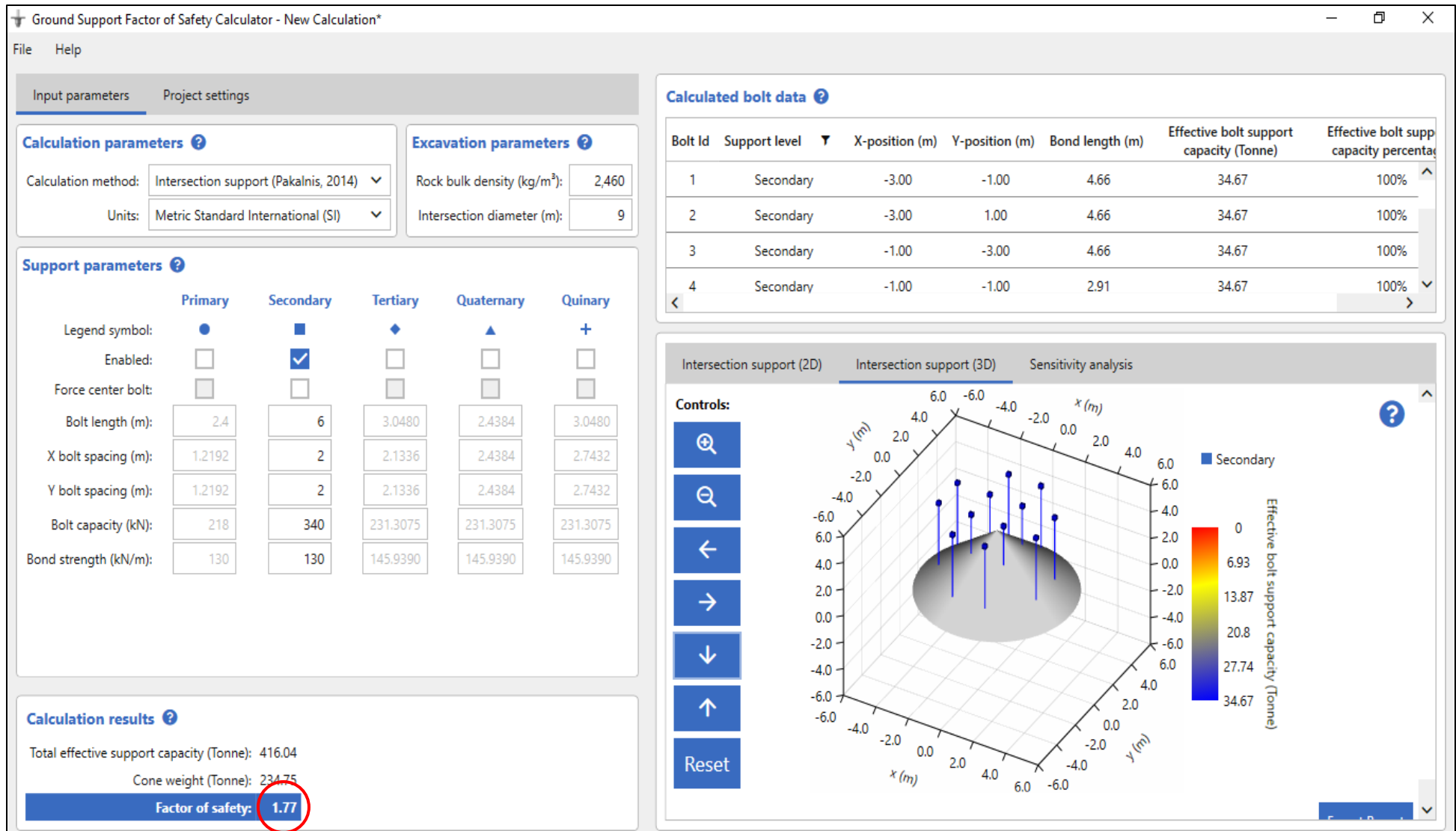


Figura 24. Análisis de peso muerto en el software Calculadora del Factor de Seguridad de Soporte Terrestre en Intersecciones

- Utilizando la calculadora de NIOSH para las intersecciones de 3 vías y de 4 vías, utilizando pernos de acero galvanizado de 6.0m, espaciados en un patrón de 2.0m x 2.0m, capacidad del perno de 340 kN, se obtiene un F.S de 1.77 lo cual indica que las intersecciones quedan estables y seguras.

4.3. Control de Calidad del Sostenimiento

El control de calidad para el nuevo método de sostenimiento instalado en el nivel 3750, se ha realizado mediante ensayos de Pull Test en pernos con fibra de vidrio y ensayos de compresión simple del shotcrete, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

4.3.1. Ensayos de Pull Test

Como parte del cumplimiento del control de calidad de los pernos instalados en las labores de rehabilitación del Nivel 3750, se realizaron las pruebas de control de resistencia o pull test, el día 18 de octubre del año 2023, el día 5 de noviembre del año 2023 y el día 25 de noviembre del año 2023, en acompañamiento a ARM quien a través de la empresa especializada DSI ejecutó las pruebas con la maquina ENERPAC.

La 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. Usamos 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, la gata debe ser capaz de aplicar la carga en menos de un minuto.

Los tramos donde se realizaron las pruebas de pull test son Rp 3750 (Pk 0+010 a Pk 0+180), Sur (GAL 179 SE -hasta Pk 0+420).

- **Rampa 3750:** 12 ensayos pull test.
- **Zona Sur:** 8 ensayos pull test.

A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 25. Resultados de los ensayos de pull test en pernos con fibra de vidrio

Fecha de ensayo	N° de Prueba	Labor	Progresiva	Hastial	Diámetro de la broca (mm)	Tipo de Roca	Resultados (Tn)
18/10/2023	1	RP 3750	PK0+060	R	38	III-B	14
	2	RP 3750	PK0+065	L	38	III-B	12
	1	RP 3750	PK0+070	R	38	III-B	13
	2	RP 3750	PK0+073	R	38	III-B	12
	1	RP 3750	PK0+120	L	38	III-B	12
	2	RP 3750	PK0+128	R	38	IV-B	12
	1	RP 3750	PK0+130	L	38	III-B	14
5/11/2023	2	RP 3750	PK0+134	R	38	III-B	13
	1	RP 3750	PK0+140	R	38	III-B	12
	2	RP 3750	PK0+146.5	L	38	III-B	11
	1	RP 3750	PK0+150	L	38	III-B	14
	2	RP 3750	PK0+152	R	38	III-B	13
25/11/2023	1	CX 244 SW	PK0+24	L	38	IV-B	11
	1	CX 294 NE	PK0+290	R	38	IV-B	11
	1	CX 344 NE	PK0+340	R	38	III-B	14
	1	CX 394 SW	PK0+390	L	38	III-B	13
	1	CX 420 NE	PK0+420	R	38	III-B	12
	1	CX 460 NE	PK0+460	L	38	III-B	11



Figura 25. Ensayos de pull test aplicados a pernos de fibra de vidrio con la máquina de arranque de pernos ENERPAC



Figura 26. Manómetro marcando 14 TN de resistencia a la tracción en la progresiva PK0+060 de la RP 3750 – Chaquicocha UG

Los resultados indican que la capacidad de anclaje de los pernos de fibra de vidrio supera las 10TN, por ende, el nuevo método de sostenimiento en zona de sulfuros implementado en el nivel 3750 de Chaquicocha UG es el adecuado.

4.3.2. Control de calidad del Shotcrete

4.3.2.1. Ensayos de resistencias tempranas del shotcrete

El avance en la rehabilitación del sostenimiento del Nv. 3750 está fuertemente influenciado por el desarrollo de resistencias a edades tempranas, ya que determina la continuidad del ciclo de minado de manera segura.

En la figura 29, se muestra las resistencias tempranas obtenidas en el lanzado de shotcrete – Nv. 3750, en la cual se observa que estas superan la curva J2 (resistencias tempranas mínimas para trabajos en tunelería) según establece la norma EN 14487-1 (32), incluso llegando a la curva J3 la cual según norma se usa este rango para sostenimiento en macizos rocosos con condiciones adversas, pero este no es el caso del Nv. 3750, por ende estos resultados favorables nos dan la seguridad al continuar el ciclo de minado.

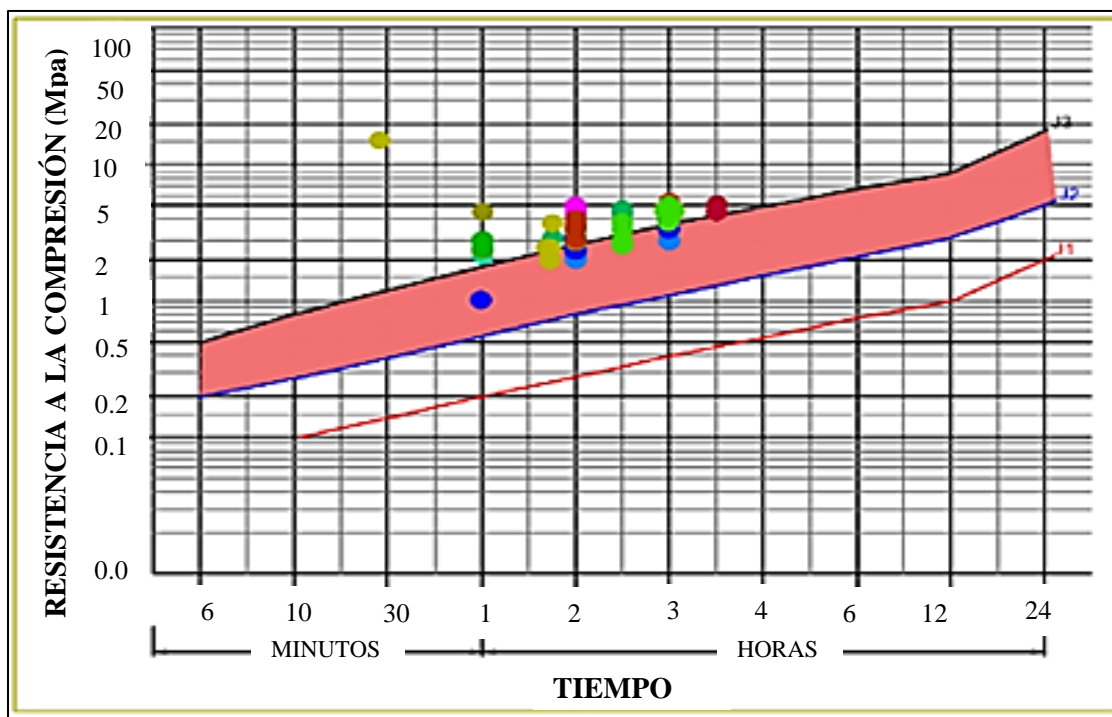


Figura 27. Resistencias tempranas obtenidas en el lanzado de Shotcrete en el Nv. 3750

4.3.2.2. Ensayos de compresión simple del shotcrete

En los ensayos de compresión simple los paneles son muestreados cerca del lugar donde ha sido lanzado el shotcrete, después de 12 horas se transportará en sus molduras de madera para evitar que se quiebre o se dañe durante el viaje al lugar donde se realiza el ensayo. Los paneles de prueba deben curarse en la poza de curado sumergidos completamente en agua, 24 horas después del lanzado, teniendo en cuenta la temperatura y el PH del agua. Después del período de curado correspondiente, las muestras serán extraídas de los paneles utilizando cortadora o corona de diamante. Cada panel lanzado debe mantener un registro de:

- Fecha del lanzado.
- Fecha de ensayo a edades tempranas.
- Fechas de ensayos de resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 y 28 días. Las pruebas de resistencia final se llevan a cabo a 28 días, en conformidad con la norma EN-14488-1.

Tabla 26. Ensayo de resistencia a la compresión simple de paneles de shotcrete en el Nv. 3750

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE SEGÚN NORMA ASTM C - 39 EN PANELES

Código de Muestra	Shotcrete F'C (Mpa)	Fecha de vaciado	Ubicación del vaciado	Edad	Fecha de ensayo	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm)2	Fuerza (KN)	Esfuerzo (Mpa)	% de Resistencia	Observaciones
PT CH - ARM - ST - SH - PN - 002	35 Mpa	07/10/23	RP 3750: PK0+020 - PK0+023	3	10/10/23	95	150	7088.24	191.6	26.47	72.6	Panel obtenido de la PK0+020 donde requiere lanzado de shotcrete
				3	10/10/23	95	150	7088.24	167.17	23.1	63.35	
				7	14/10/23	95	150	7088.24	227.79	29.52	85.52	
				7	14/10/23	95	150	7088.24	220.5	27.1	80.7	
				14	21/10/23	96	150	7238.25	257.59	35.59	97.61	
				14	21/10/23	96	150	7238.25	276.7	38.23	104.85	
				28	05/10/23	96	150	7238.25	281.14	39.66	108.79	
				28	05/10/23	96	150	7238.25	317.33	44.77	122.79	

- Ensayo tomado a 8 paneles donde se hace 2 pruebas de compresión simple cada 3, 7, 14 y 28 días; dando como resultado una resistencia final mayor a 35 Mpa a los 28 días, lo cual cumple con lo establecido.

4.4. Contraste de la Hipótesis

Esta investigación contrasta la hipótesis ya que la inestabilidad del Nv. 3750 se ha originado principalmente por la fuerte presencia de sulfuros en la zona, la corrosión del acero, además de la precipitación, infiltración y sismicidad, las cuales afectan las condiciones litológicas, geomecánicas y tipo de sostenimiento, demostrando que el nuevo método de sostenimiento con pernos fibra de vidrio y pernos de acero galvanizado, más el grouting resulta ser eficaz, ya que este tipo de materiales resisten a la corrosión originada por el sulfuro y garantizan la estabilidad de la excavación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Mediante las clasificaciones geomecánicas RMR, se determinó que el macizo rocoso del Nivel 3750 de Chaquicocha UG presenta principalmente roca tipo III ("regular") con zonas puntuales de tipo IV ("mala"). Esto permitió diseñar un sostenimiento diferenciado, optimizando recursos y garantizando estabilidad según las condiciones geomecánicas específicas.

El análisis mediante el software de NIOSH confirmó que el nuevo método de sostenimiento cumple con un factor de seguridad (F.S) mayor a 1.50 en todas las labores evaluadas, incluyendo las intersecciones. Esto demuestra que la combinación de shotcrete, pernos fibra de vidrio y pernos de acero galvanizado proporciona estabilidad a corto, mediano y largo plazo.

Los exhaustivos controles de calidad realizados en el Nivel 3750 de Chaquicocha UG han validado plenamente la eficacia del innovador sistema de sostenimiento implementado. Los ensayos de tracción en pernos de fibra de vidrio superaron consistentemente las 10 TN de resistencia, demostrando su capacidad para soportar las cargas estructurales en condiciones sulfurosas. Paralelamente, los análisis de compresión del shotcrete confirmaron un desempeño sobresaliente, alcanzando resistencias superiores a 35 MPa tras el período de curado de 28 días.

5.2. Recomendaciones

Inspeccionar periódicamente el comportamiento del macizo rocoso y el desempeño del nuevo sostenimiento, especialmente en zonas con alta concentración de sulfuros.

Realizar estudios adicionales sobre el comportamiento a largo plazo de los pernos de fibra de vidrio en condiciones de humedad y estrés geomecánico y explorar nuevas tecnologías de sostenimiento activo y pasivo que puedan adaptarse a condiciones aún más adversas.

Realizar análisis geotécnicos y geomecánicos exhaustivos en puntos críticos del Nivel 3750 con la finalidad de tener data más precisa y actualizada para realizar una buena recomendación en el sostenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

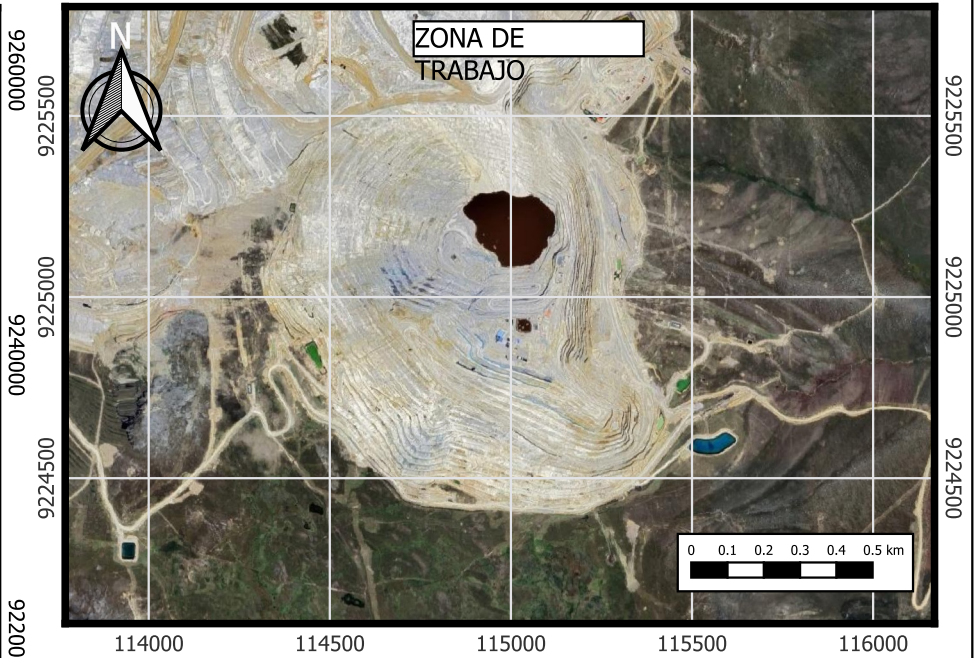
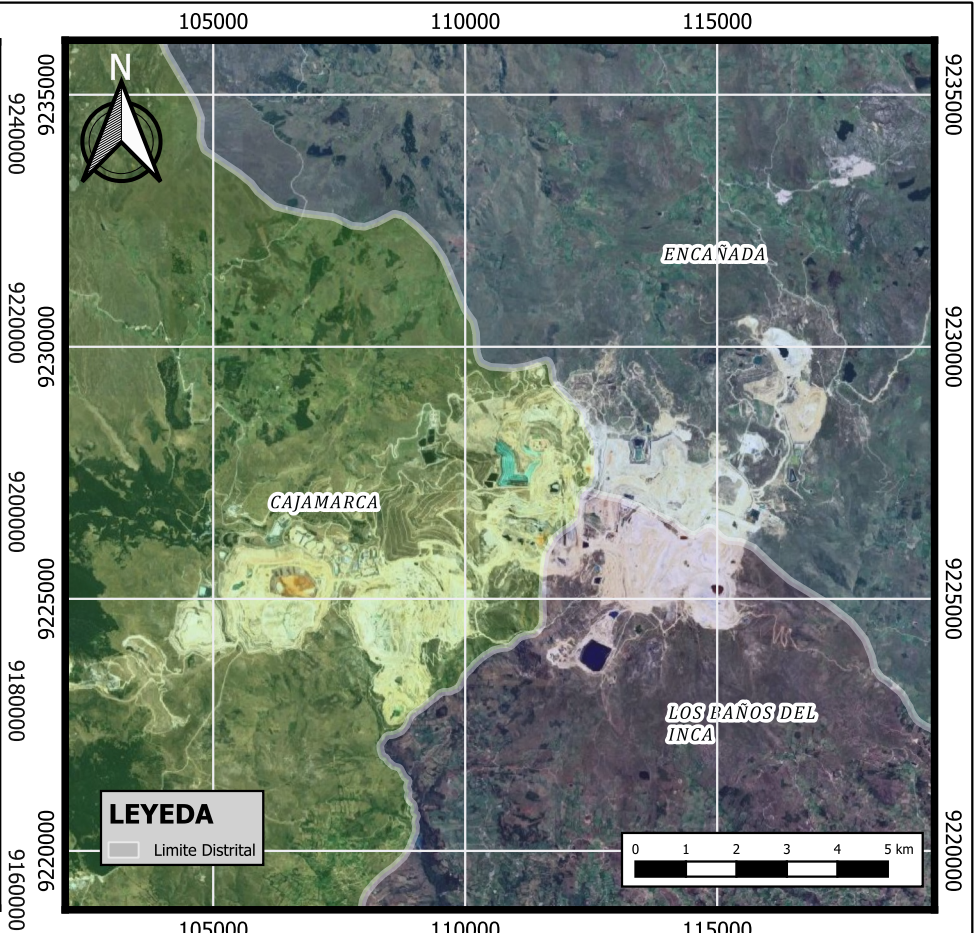
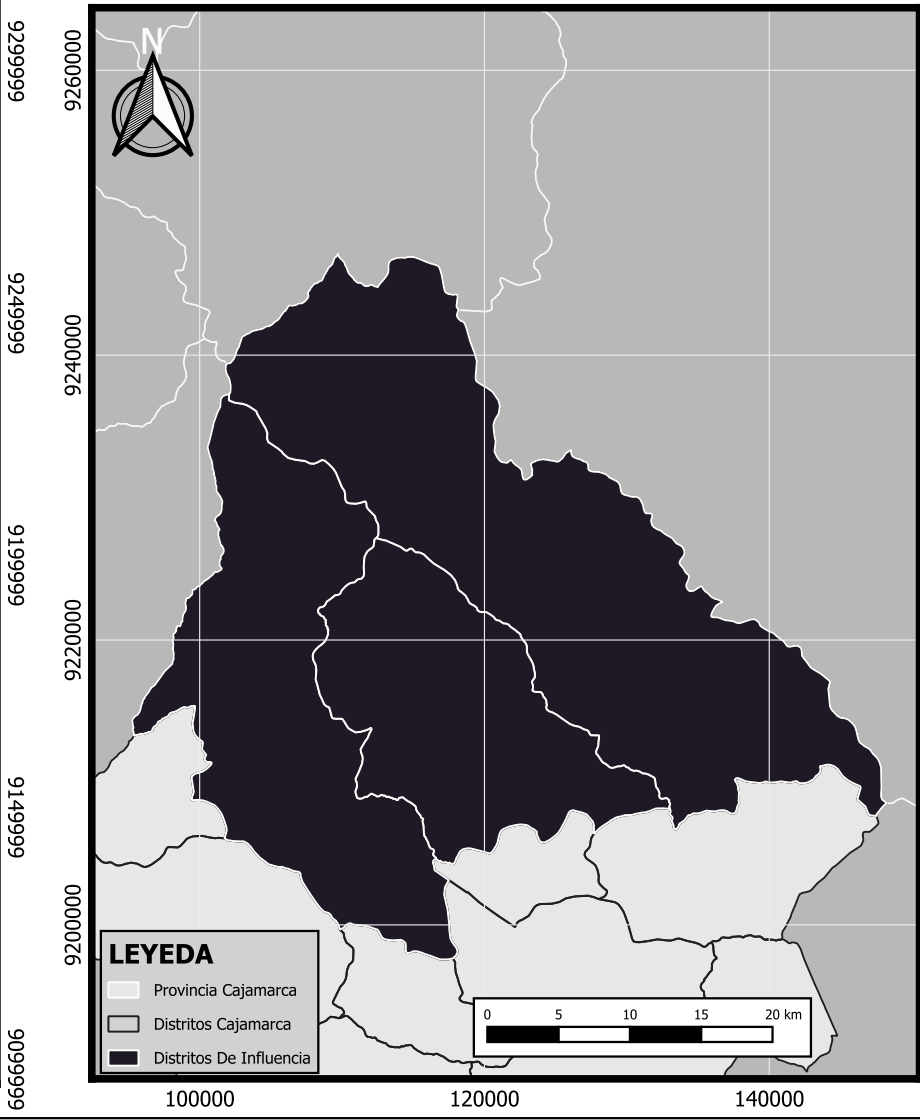
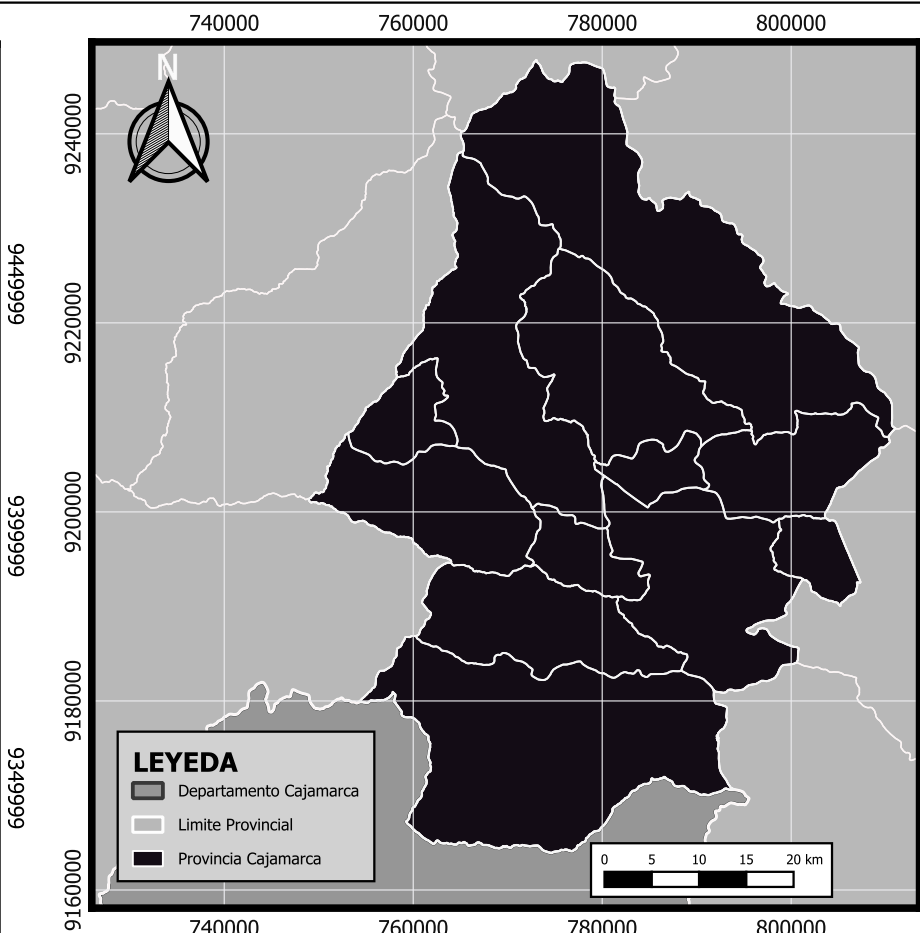
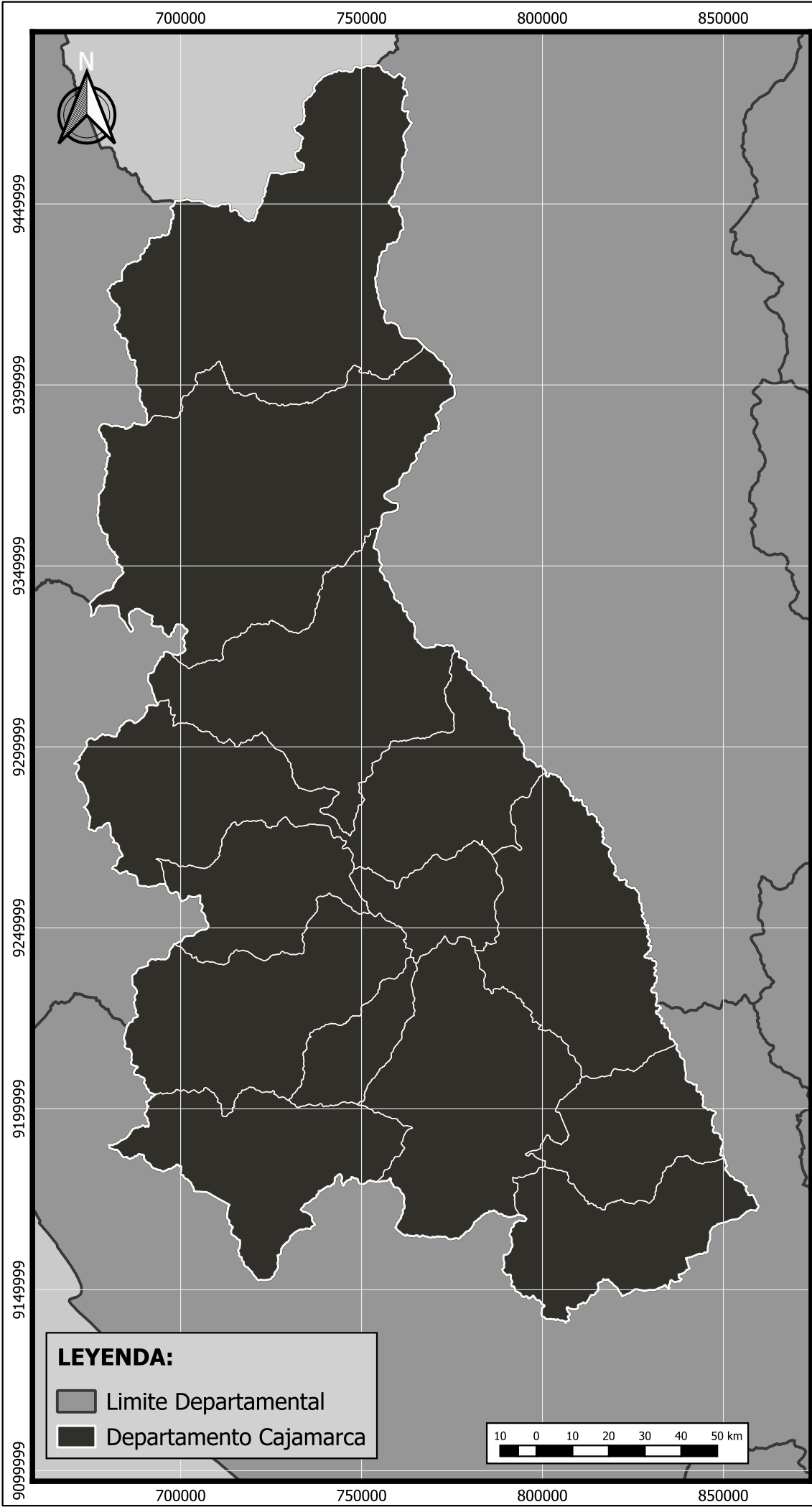
- Ampuero, J., Castañeda, S., & Lezama, J., 2015. Propuesta de aplicación del método de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento. (*Tesis Maestría*). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú . Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/592695/TESIS%202015%20RevFinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Conar SAC, 4 de Abril de 2023. Obtenido de ¿Que es el shotcrete y para que se usa?: <https://conarsac.com/blog/shotcrete/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20shotcrete%3F,se%20adhiera%20a%20la%20superficie.>
- DSI Underground Group, 24 de Octubre de 2024. Obtenido de Sistema perno de fibra DSI Underground: <https://www.dsiunderground.com/es/latam/productos/sistemas-de-anclaje/sistema-perno-fibra>
- Flexicon, 25 de octubre de 2024. Obtenido de Sulfuro: <https://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/Sulfuro.html#:~:text=El%20sulfuro%20es%20la%20principal,caucho%20y%20producci%C3%B3n%20de%20nailon.>
- Geoteknik S.A.C, 30 de Octubre de 2024. Obtenido de Prueba PULL TEST: <https://geoteknik.com.pe/producto/equipo-de-prueba-pull-test/>
- Herrera, E., 2021. Evaluación geomecánica para el diseño del sostenimiento del túnel de exploración chaquicocha fase ii - minera yanacocha SRL, 2018. (*Tesis Pregrado*). Universidad Nacional Cajamarca, Cajamarca. Obtenido de https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4150/TESIS%20PROFESIONAL_%20Edilberto%20Herrera%20Irigo%C3%ADn.pdf?sequence=4
- Herrera, J., 2017. Obtenido de Introducción a la minería: https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf
- Hilti Corporation, Diciembre de 2021. Obtenido de Instrucciones de ensayo del sistema BX3-SCT: https://www.hilti.com.pe/medias/sys_master/documents/ha4/h7e/9766319390750/Hilti-BX-3-SCT-Metodo-de-ensayodel-sistema-12-2021-Informacion-tecnica-ASSET-DOC-17000345.pdf
- Huamani, L., & Benites, A., 2016. Obtenido de XVIII Congreso Peruano de Geología: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-48.pdf>
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Octubre de 2015. Obtenido de Shotcrete guía chilena del hormigón proyectado : https://www.academia.edu/24207957/shotcrete_gu%C3%ADa_chilena_del_hormig%C3%B3n_proyectado


- Laboratorio oficial JM. Madariaga, 2015. Obtenido de GUÍA SOBRE CONTROL GEOTÉCNICO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA: <https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf>
- Ley N° 20551, Agosto de 2020. *Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras*. Chile. Obtenido de <https://ciperchile.cl/wp-content/uploads/ley-20551.pdf>
- López, J., 2019. Obtenido de Manual de sostenimiento : <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-callao/educacion-para-la-salud/sostenimiento-lopez-jhojan/68032536>
- Osinermin, Mayo de 2017. Obtenido de Guia Criterios Geomecanicos: https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf
- Ramírez, A., & San José, C., 2006. Obtenido de El Azufre en la Naturaleza : <https://www.rade.es/doc/1V10N2-ramirez-san%20jose-azufre.pdf>
- Rodríguez, A., & Pérez, A., 2017. *Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento*. Revista EAN. Obtenido de <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rodríguez, J., Abril de 2007. Obtenido de Caracterización de macizo rocoso: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/62365/2007Caracterizaci%C3%B3nMacizosRocosos.pdf?sequence=1#:~:text=Macizo%20rocoso%3A%20conjunto%20de%20matriz,su%20comportamiento%20geomec%C3%A1nico%20e%20hidr%C3%A1ulico.>
- Rodriguez, M., 2022. Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento Necesario Para la estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo Rcoso en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble. (*Tesis Pregrado*). Universidad de Caldas, Caldas, Manizales, Colombia. Obtenido de <https://repositorio.ucaldas.edu.co/server/api/core/bitstreams/f619d9a9-d7a8-4dd8-b5cc-670cc9e9c5fe/content>
- Sassani, I., 13 de Julio de 2020. Obtenido de ¿Qué son los pernos de anclaje?: <https://estudiosassani.wordpress.com/2020/07/13/que-son-los-pernos-de-anclaje-sus-tipos-y-usos/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018. Obtenido de Guía Metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/GUIA-METODOLOGICA.pdf>
- Sigma DG, Septiembre de 2024. Obtenido de Sigma DG Fiberglass Systems: <https://sigmadg.com/products/fiberglass-rock-bolts/fiberglass-rock-bolts/>

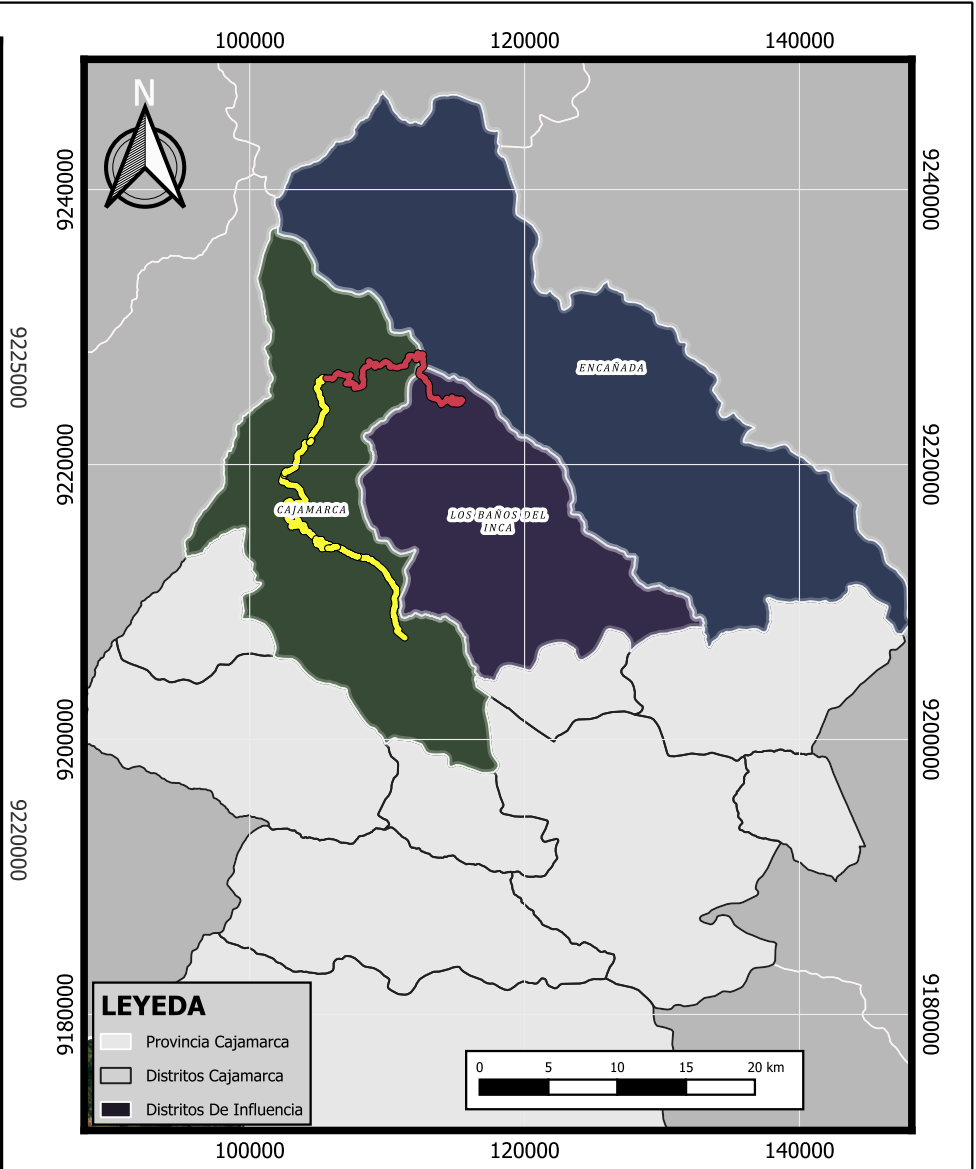
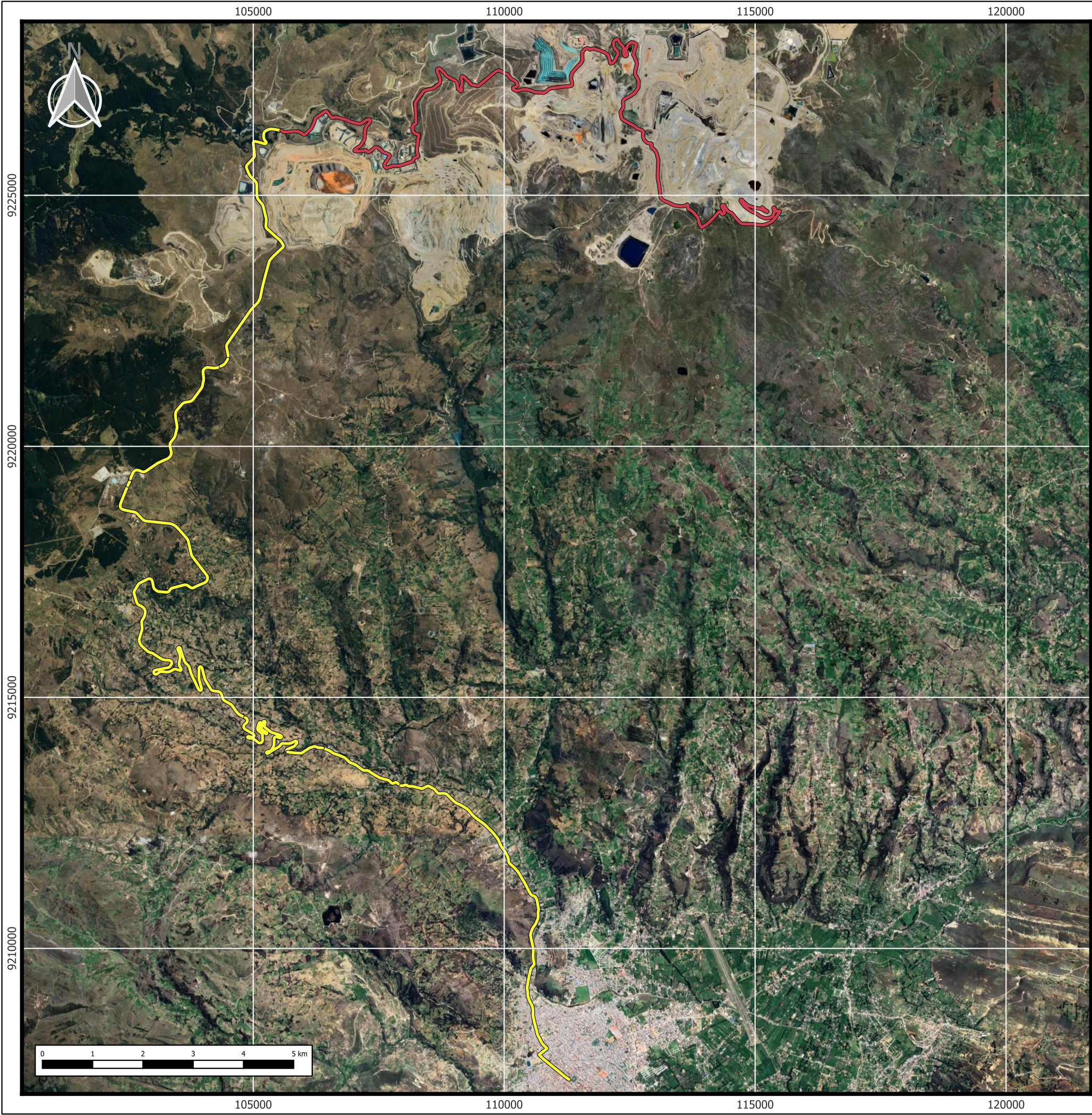
- Sika, Mayo de 2020. Obtenido de Sika AnchorFix 3001:
<https://per.sika.com/es/construccion/grouting-ancclajes/ancclajes-quimicos/sika-anchorfix-3001.html>
- Sika, 24 de Octubre de 2024. Obtenido de Grouting y ancclajes:
<https://per.sika.com/es/construccion/grouting-ancclajes.html>
- Top Metal, 13 de Octubre de 2024. Obtenido de Barra hueca roscada:
<https://es.hdtopmetal.com/products/hollow-bar-anchor-bolt.html>
- Turner, R., 17 de Julio de 2023. Chaquicocha Subterránea – Estándar de Soporte Terrestre Actualizado. Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Vara, A., 2012, *7 pasos para una tesis exitosa*. Lima. Recuperado el 12 de Noviembre de 2024, de <https://www.administracion.usmp.edu.pe/investigacion/files/7-PASOS-PARA-UNA-TESIS-EXITOSA-Desde-la-idea-inicial-hasta-la-sustentaci%C3%B3n.pdf>

ANEXOS

- 1.** Plano de Localización y Ubicación del proyecto Chaquicocha UG
- 2.** Plano de Accesibilidad al proyecto Chaquicocha UG
- 3.** Plano en Planta del Nv. 3750
- 4.** Plano de Zonificación Geomecánica del Nv. 3750
- 5.** Plano de Mapeo Geomecánico del Shotcrete en el Nv. 3750
- 6.** Plano de Diseño de Sostenimiento en Intersecciones en el Nv. 3750
- 7.** Evaluación Riesgos pasivos lineales Newmont del Nv. 3750
- 8.** Pruebas de Pull Test en el Nv. 3750
- 9.** Autorización para el uso de información




UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA		
FACULTAD DE INGENIERÍA		
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICHOCHA UG CAJAMARCA PERÚ		
	PLANO DE LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN CARLOS LLANOS PEREZ	01
	ASESOR: Dr. CRISPIN ZENÓN QUISPE MAMANI	
CAJAMARCA-PERÚ		ESCALA: INDICADA

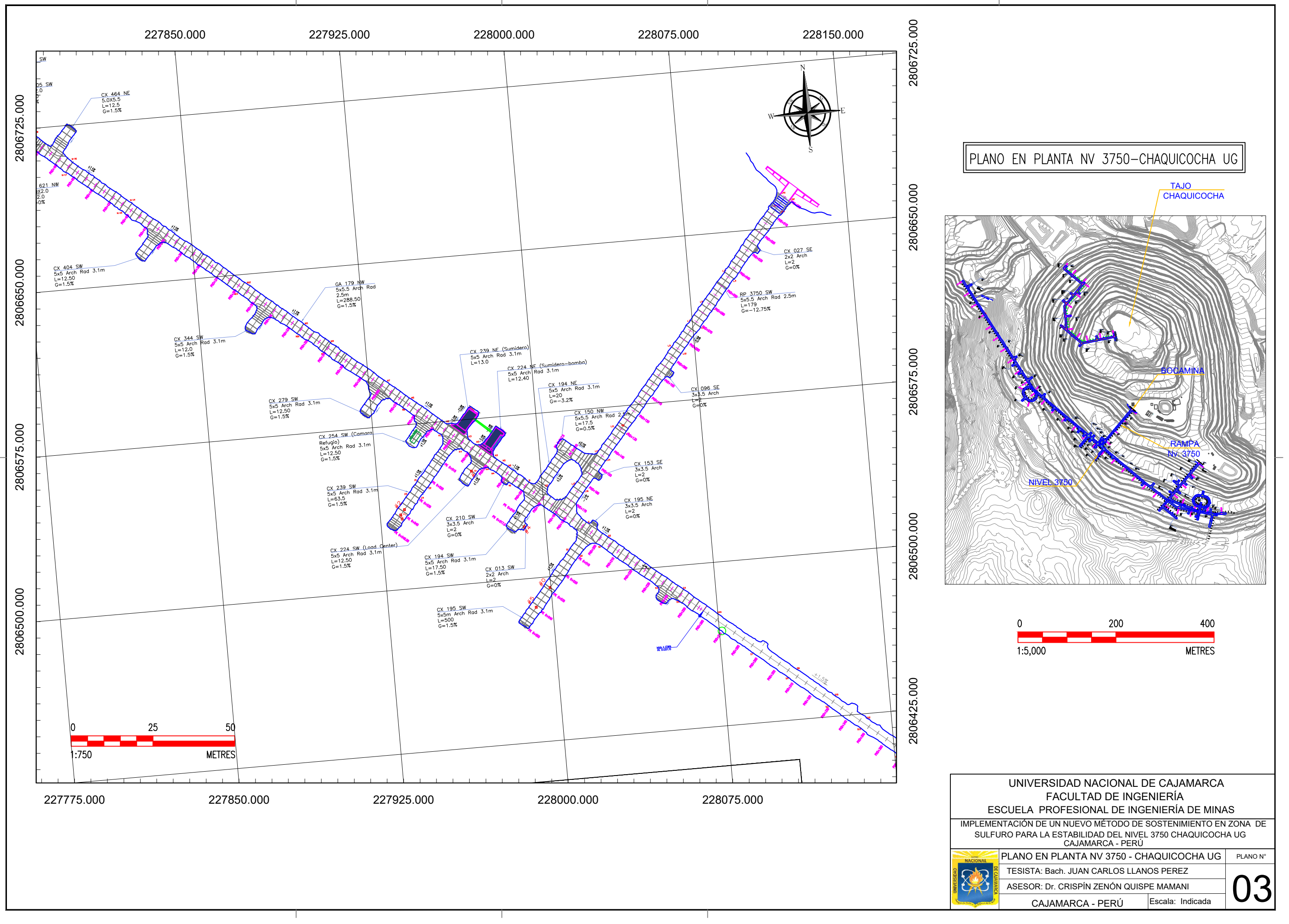


LEYENDA

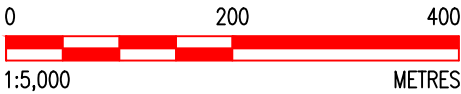
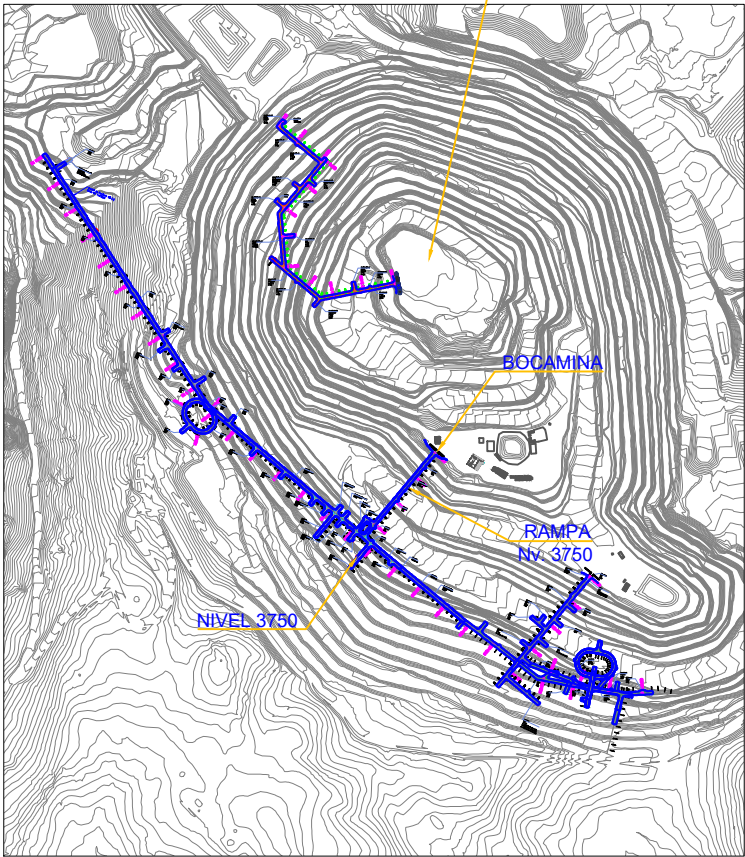
— RUTA CAJAMARCA A GARITA HUANDOY


— RUTA GARITA HUANDOY A TAJO CHAQUICOCHA

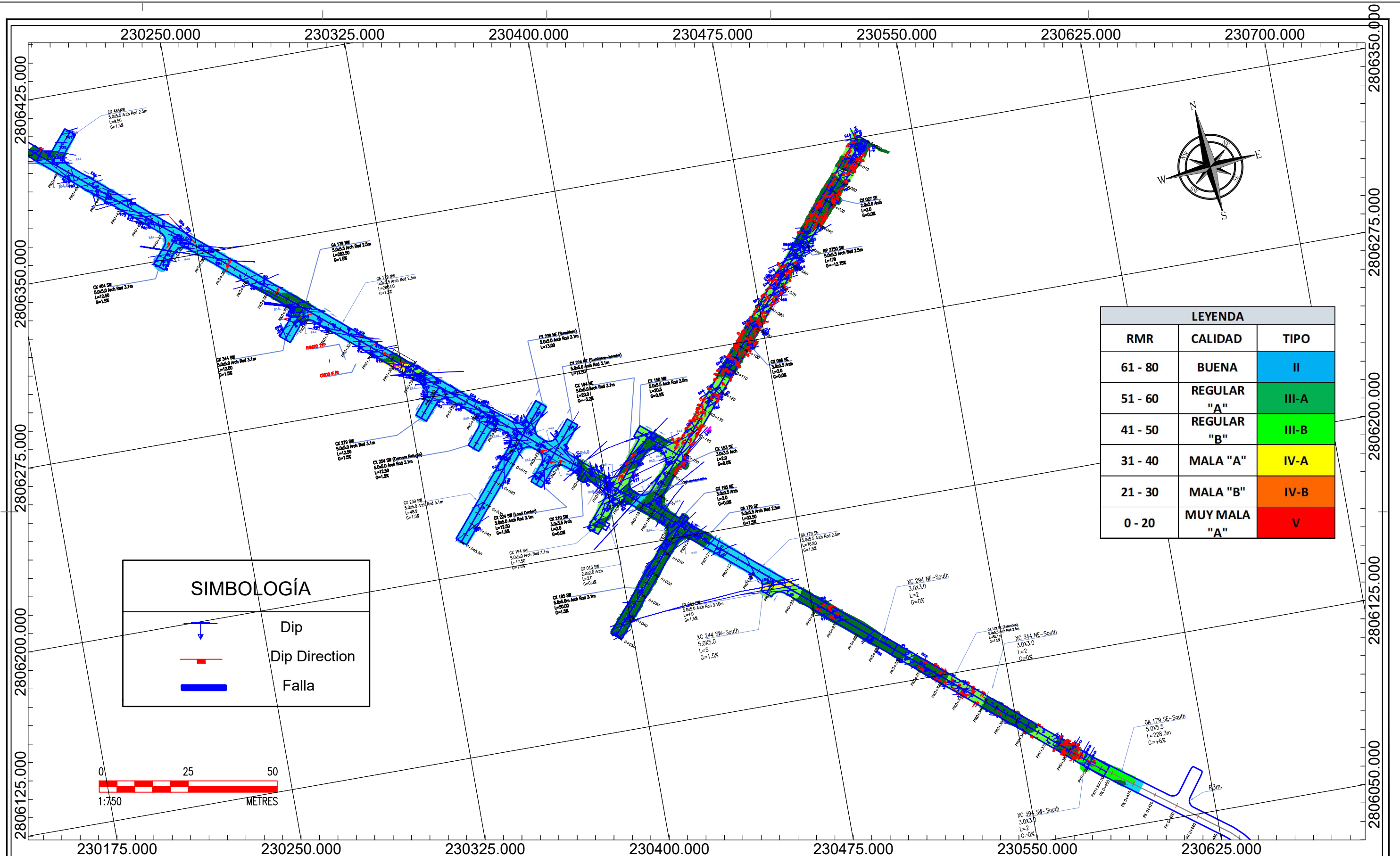
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA PERÚ		
	PLANO DE ACCESIBILIDAD	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN CARLOS LLANOS PEREZ	02
	ASESOR: Dr. CRISPIN ZENÓN QUISPE MAMANI	
CAJAMARCA-PERÚ	ESCALA: INDICADA	




PLANO EN PLANTA NV 3750-CHAQUICOCHA UG




UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA - PERÚ		
	PLANO EN PLANTA NV 3750 - CHAQUICOCHA UG	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN CARLOS LLANOS PEREZ	03
	ASESOR: Dr. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI	
CAJAMARCA - PERÚ		Escala: Indicada




SIMBOLOGÍA



Dip

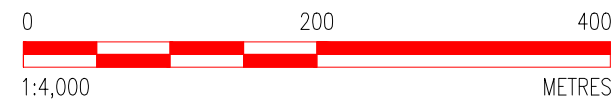
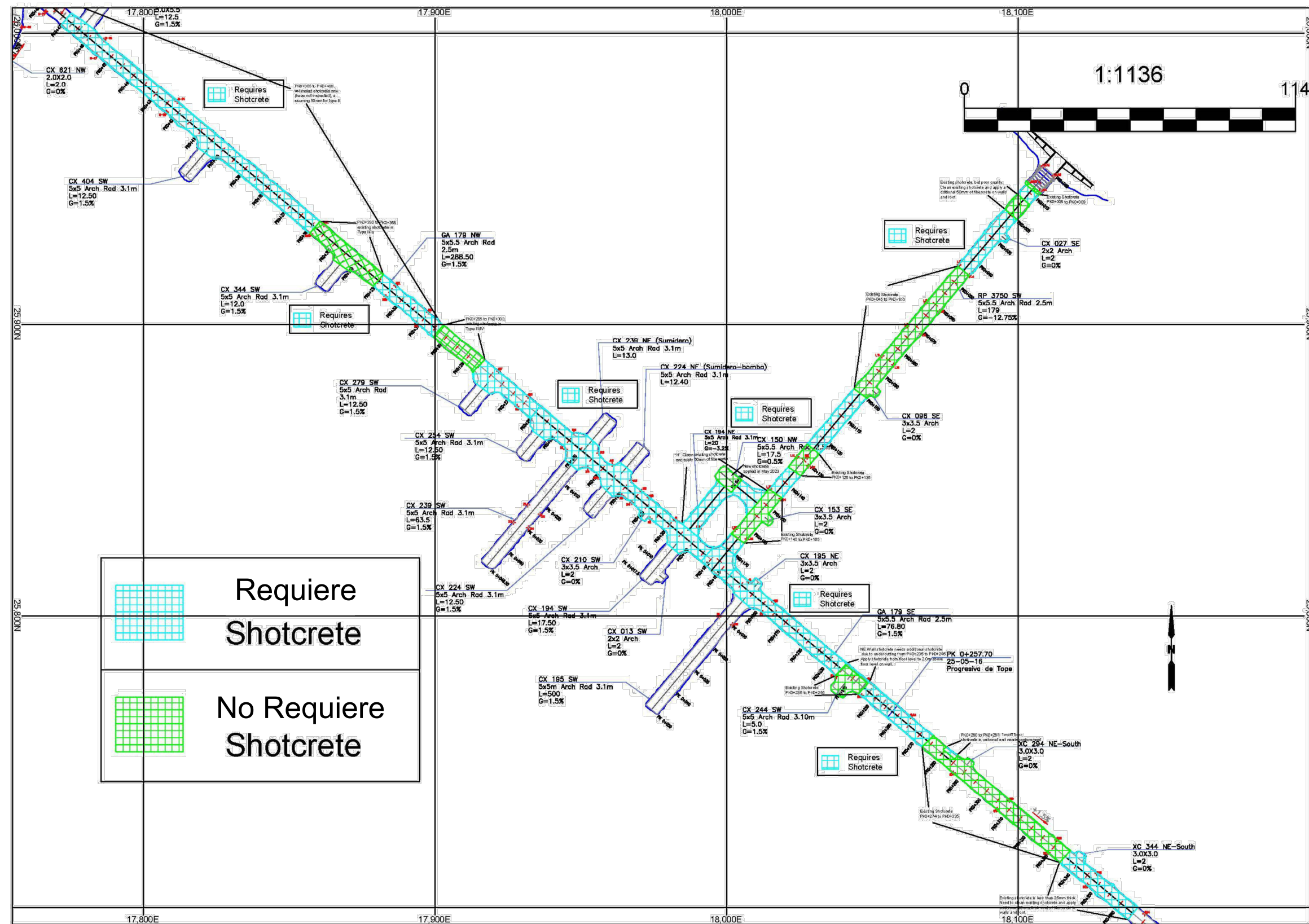


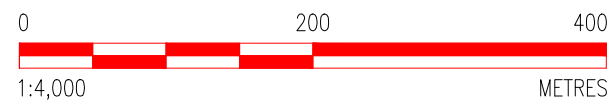
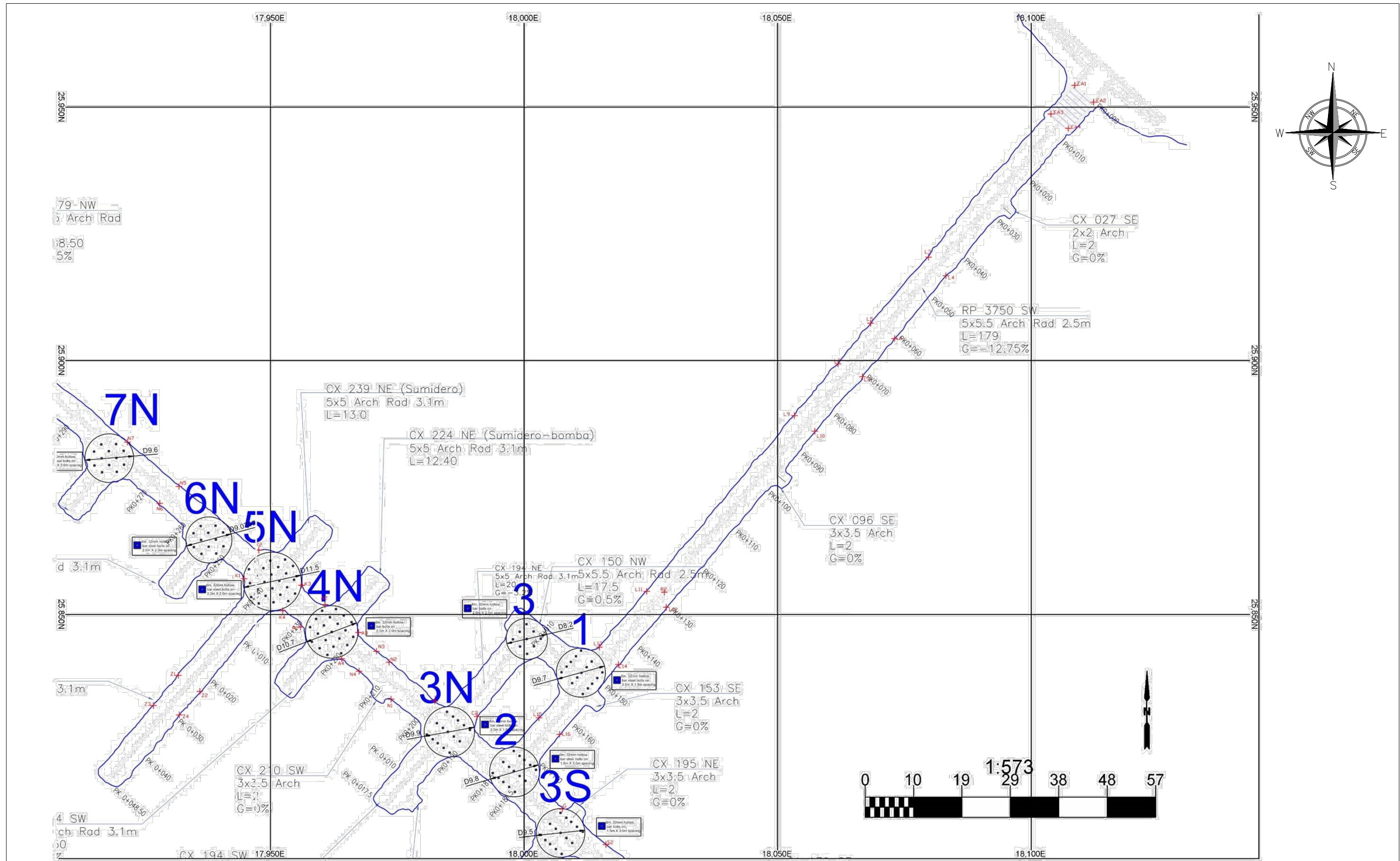
Dip Direction




Falla



LEYENDA		
RMR	CALIDAD	TIPO
61 - 80	BUENA	II
51 - 60	REGULAR "A"	III-A
41 - 50	REGULAR "B"	III-B
31 - 40	MALA "A"	IV-A
21 - 30	MALA "B"	IV-B
0 - 20	MUY MALA "A"	V





UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO EN ZONA DE SULFURO PARA LA ESTABILIDAD DEL NIVEL 3750 CHAQUICOCHA UG CAJAMARCA - PERÚ		
	DISEÑO DE SOSTENIMIENTO EN INTERSECCIONES Nv. 3750	PLANO N°
	TESISTA: Bach. JUAN CARLOS LLANOS PEREZ	
	ASESOR: Dr. CRISPÍN ZENÓN QUISPE MAMANI	
CAJAMARCA - PERÚ		Escala: Indicada

06



CHECK LIST DE EVALUACION DE RIESGOS EN EXCAVACIONES LINEALES

Codigo:

EL-RP. 3750_01

Empresa

YANACocha

Fecha de inspección

6/07/2022

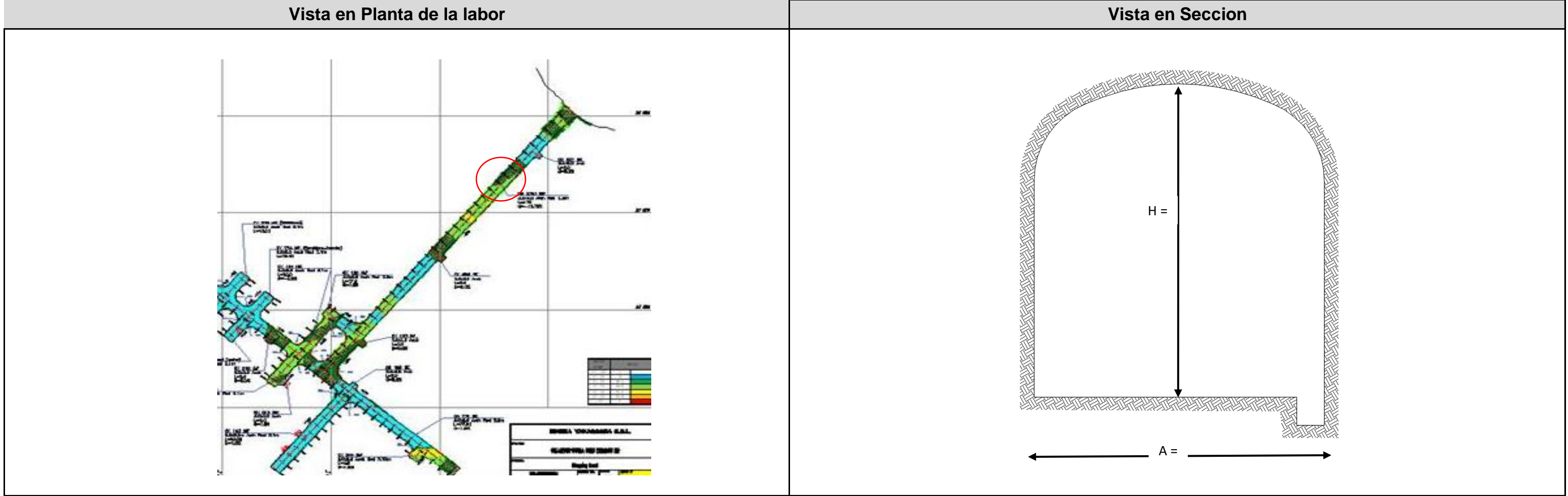
Labor

RP. 3750 - PROG. 0+050

Fecha de sostenimiento

2016

Criterios de Evaluación		Baja	Puntuación	Moderada	Puntuación	Alta	Puntuación
EXPOSICIÓN	Via de Acceso de Alto Tránsito	Sin transito / Bloqueado	1	Puntualmente	5	Continuamente	12
	Bloques de Roca y/o shotcrete sueltos en corona o hastiales.	No presenta. Baja probabilidad de caída de bloques	0	Se evidencia de forma puntual. Probabilidad media de caída de bloques.	5	Alta probabilidad de caída de bloques	10
	Sección irregular en corona y/o hastiales (realces, voladizos, sobre-excavación)	Sección adecuada de labor sin entrantes ni salientes	2	Se evidencia realce y sobre-excavación < 15%	3	Se evidencia realce y sobre-excavación > 15%	5
	Tiempo de Abertura	< 6 meses	2	De 6 meses a 2 años	4	> 2 años	6
PROBABILIDAD DE FALLA	Calidad de Roca	Buena (RMR > 60)	1	Regular (RMR 40 - 60)	3	Mala (RMR < 40)	6
	Falta Completar sostenimiento de acuerdo al estandar establecido	Sostenido según Estandar Geomecánico	0	Sostenido Parcialmente	5	No sostenido	20
	Juntas, Fallas, diaclasas, etc	Perpendicular a la labor	3	En desface con la labor	4	Paralelas a la labor	5
	Presencia de agua	Seco	2	Goteo (húmedo)	3	Flujo continuo (saturado)	5
	Tipos de pernos de anclaje	Helicoidal / Cable Bolting	1	Hydrabolt/Swellex/Split set	3	Sin pernos	6
	Problemas tensionales en las rocas (sismicidad inducida)	Condiciones tensionales favorables (No lajamientos) $\sigma_v/\sigma_c < 0.15$	1	Leves Lajamiento (astillamientos) $0.15 < \sigma_v/\sigma_c < 0.40$	2	Lajamientos moderados, Estallidos de roca $0.40 < \sigma_v/\sigma_c$	3
SOSTENIMIENTO	Estados del perno de Anclaje y placas (Corrosión/deformación)	Sin corrosión / Placas sin deformación	0	Corrosión moderada / Placas ligeramente deformadas	3	Corrosión alta / Placas deformadas	5
	Distribución de los pernos de anclaje	Variación < 5%	0	10 - 20%	1	> 20%	3
	Soporte de Malla Electrosoldada (Corrosión)	sin corrosion	0	Moderada - Ligera	2	Alta	4
	Perforamance de la Malla Electrosoldada (Rasgada, Abierta, sin Ceñir, etc)	Ceñida al macizo rocoso en seccion completa	0	Mal Ceñida /Traslapada y rasgada	2	Enbolsada con material / rasgada	3
	Soporte de Shotcrete (Grietas)	< 10 mm EN HASTIALES (grietas horizontales L<1.0m)	1	10 - 20mm CORONA Y/O HASTIALES (grietas horizontales long. >10m)	3	> 20mm CORONA Y/O HASTIALES (grietas horizontales y verticales toda la sección)	5
	Performance del shotcrete (sostenimiento de piso-piso)	Suspendido, bajo de la gradiente, sin inestabilidad	1	Suspendido, sobre la gradiente, sin inestabilidad	2	Suspendido, con inestabilidad	5



Observaciones			

CATEGORÍA DEL RIESGO			CONTROL	ACCION A TOMAR
RA	RIESGO ALTO	> 65	Bloqueo y la señalización del área evaluada, comunicación a un comité multidisciplinario.	Evaluación del comité multidisciplinario de manera inmediata para realizar la evaluación y la gestión de riesgo.
RM	RIESGO MEDIO	55 - 65 (Medio Alto)	Señalización del área, y autorización entregada por geomecánica según evaluación reciente del sector.	PRIORIDAD 1: Evaluación del comité multidisciplinario para establecer plan de trabajo para la rehabilitación, plazo máximo 15 días
		45 - 54 (Medio Bajo)		PRIORIDAD 2: Establecer plan de trabajo para la rehabilitación, plazo máximo 30 días.
RB	RIESGO BAJO	< 45	Sin restricción alguna por parte de geomecánica	Instalar Monitoreo geotécnico, inspección y reevaluación contlnua cada 60 días.



PULL TEST

Rp 3750 (Pk 0+010 a Pk 0+180)

Sur (GAL 179 SE -hasta Pk 0+420)

GEOTECNIA UG

18/10/2023

ALCANCE

Como parte del cumplimiento del control de calidad de los pernos instalados en las labores de rehabilitación del Nv. 3750, se realizaron las pruebas de control de resistencia o pull test, el día 18 de octubre en acompañamiento a ARM quien a través de la empresa especializada DSI se ejecutó:

- **RAMPA 3750:** 12 ensayos pull test.
- **ZONA SUR:** 8 ensayos pull test.

Queda pendiente el informe final por parte de ARM / DSI; sin embargo, se menciona como alcance general que la capacidad de anclaje de los pernos de fibra de vidrio supera las 10TN.



RP. 3750

Figura 1: Ubicación de pernos pull test

Foto 1: Personal de DSI realizando pull test



Foto 2: Resultado perno de fibra de vidrio, 14 TN

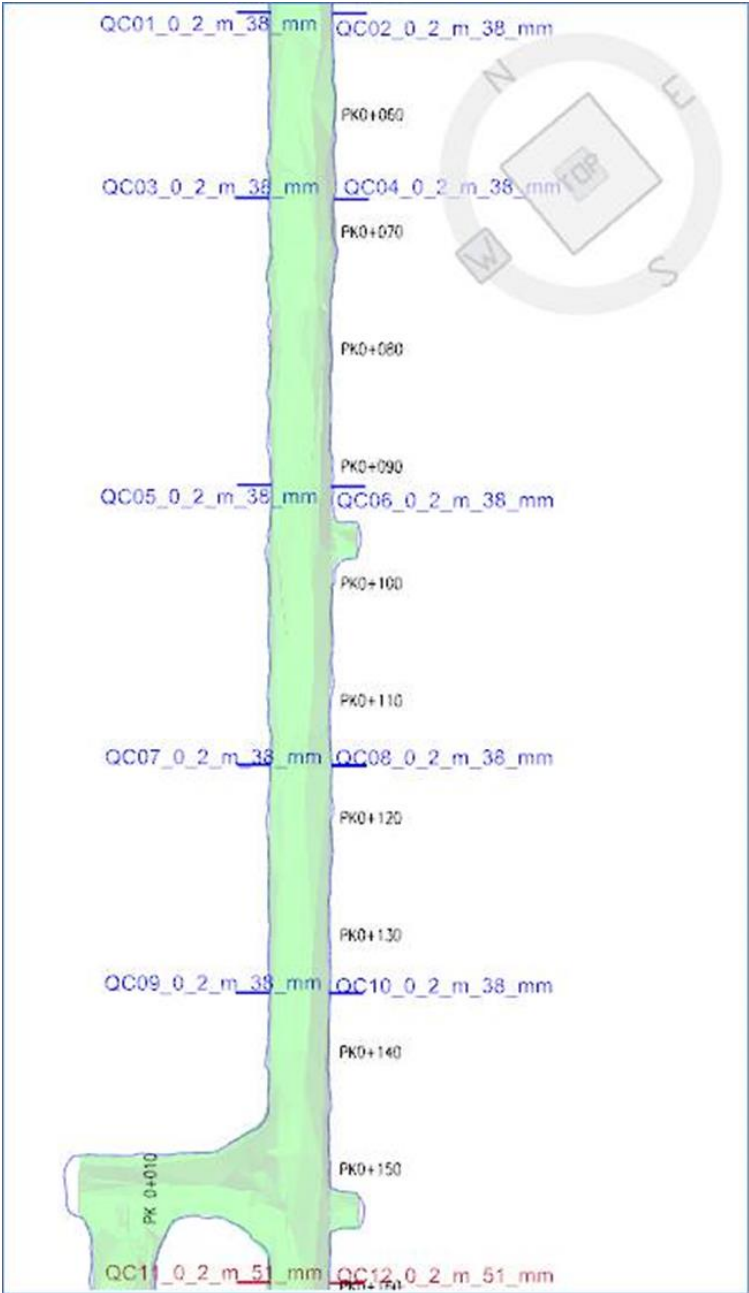


Foto 3: Resultado perno de fibra de vidrio, 11 TN



Foto 4: Manómetro marcando 11 TN

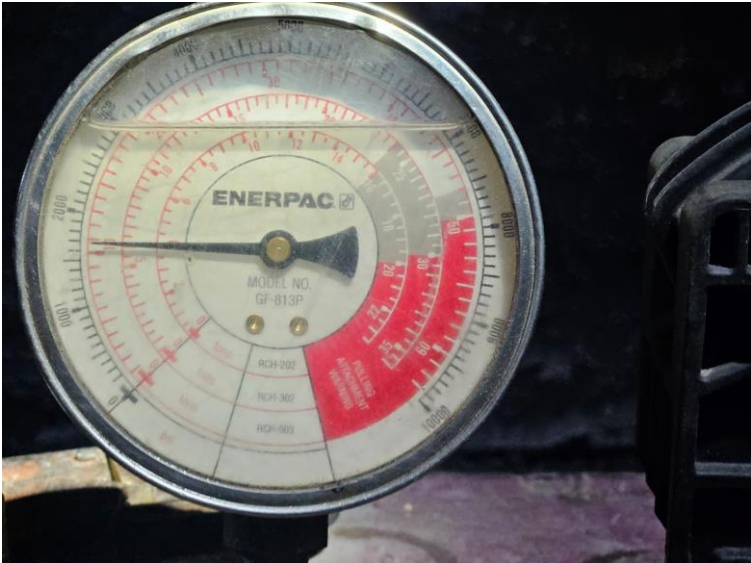


Figura 2: Ubicación de pernos pull test

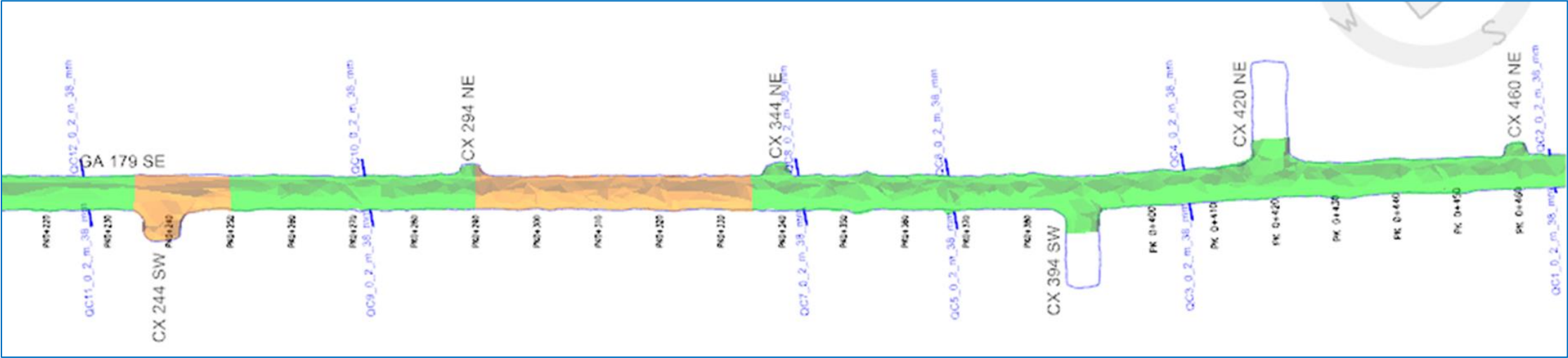


Foto 5: Personal de DSI realizando pull test



Foto 6: Resultado perno de fibra de vidrio, 14 TN

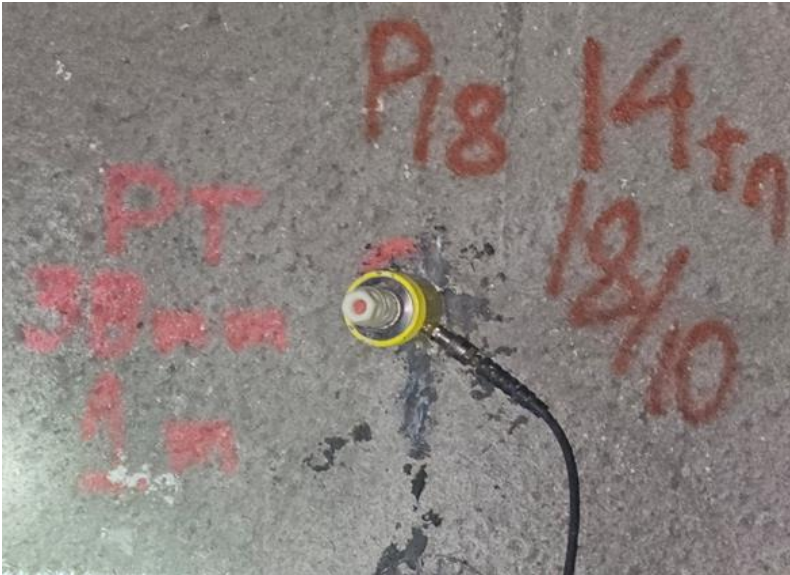


Foto 7: Manómetro marcando 11 TN



OFICIO N° 017 – 2025 D/FI/UNC

Cajamarca, 11 de diciembre del 2025

Doctor:

Carlos Aparicio Arteaga

Decano de la Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Cajamarca

Presente. -

De mi especial consideración:

Sirva la oportunidad para saludarlo, y al mismo tiempo expresarle mi agradecimiento a nombre de Newmont – Yanacocha por considerarnos como una opción para el desarrollo y crecimiento profesional de sus estudiantes.

Del mismo modo, hacemos de conocimiento que nuestra representada, ha decidido autorizar el uso de información en la tesis **“Implementación de un Nuevo Método de Sostenimiento en Zona de Sulfuro para la Estabilidad del Nivel 3750 Chaquicocha UG Cajamarca – Perú”**, que investigo el Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Cajamarca.

- Juan Carlos Llanos Perez DNI 76411265

La información recaudada para la elaboración de la tesis deberá ser considerada estrictamente para fines académicos y debe mantenerse de forma confidencial.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterarle mi consideración y estima.

Atentamente.


Marianella Cárdenas Armas
JEFE RR.HH. NEWMONT - YANACocha