

2020

PROPUESTA DE SISTEMAS DE FORTIFICACION EN TALUDES DE PEQUEÑA MINERIA PARA EVITAR CAIDA DE MATERIAL PRODUCIDAS POR VIBRACION

GUAJARDO GALVEZ, YHONATAN ALEJANDRO

<https://hdl.handle.net/11673/49476>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE SISTEMAS DE FORTIFICACIÓN EN TALUDES DE
PEQUEÑA MINERÍA PARA EVITAR CAÍDA DE MATERIAL PRODUCIDAS
POR VIBRACIÓN

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Técnico Universitario en Minería y
Metalurgia

Alumno:
Yhonatan Guajardo Gálvez

Profesor Guía:
Mg. Ing. Carlos Baldi González

RESUMEN

KEYWORDS: FORTIFICACIÓN-GEOMECÁNICA-BIENIAWSKI-VIBRACIÓN

Este trabajo de título consta una propuesta para la minera Quintay, ubicada al sureste de Valparaíso a 5km de la localidad de Peñuelas. El enfoque de este escrito está basado en un plan de mejora que puede usarse para pequeña minería. Esta propuesta consiste en una fortificación temporal en la minera a cielo abierto, con la finalidad de que la faena pueda tener un sistema de seguridad que proteja la integridad de los trabajadores, frente al desprendimiento de rocas. Dicho sistema se determinará según parámetros geomecánicos de la roca, los cuales se obtuvieron mediante informes geológicos y visitas a terreno.

Si bien la propuesta es para una fortificación temporal, es debido a que la mina está en constante expansión puesto que el mineral de interés está cada vez más profundo. Cabe destacar que es una minera ornamental y su interés son el cuarzo y feldespatos.

La idea surgió mediante visitas a terreno, donde la primera fue junto a la universidad y las posteriores para obtener datos, ya que en la mina se pudo apreciar precarias medidas de seguridad y gran cantidad de material fragmentado en los taludes de la mina.

En el primer capítulo se da a conocer las características principales de la minera explicando su ubicación, geología y Geomecánica, además de introducirnos en el daño producido por las vibraciones mediante tronaduras.

En el segundo capítulo se hablará sobre fortificación. Explicando en qué consiste, su objetivo y como se compone cada tipo de sistema. Dichos elementos se caracterizarán mediante evaluación de propiedades y capacidades para fortificar. Para que al momento de realizar el sistema, sea de sustento y con elementos que mejor se adecuen al ambiente de la mina. Este capítulo será en base a pernos y mallas de fortificación, con su respectiva descripción y análisis. En el tercer y último capítulo se desarrollará la propuesta de fortificación y se evaluará. Esto se hará mediante la selección de cada elemento de fortificación considerado para la propuesta. Se estudiarán los factores de desprendimiento de material para poder hacer la elección correcta en las zonas de mayor peligro. Se hará un estudio de fallas presentes en la mina y un análisis técnico de materiales, en donde el estudio es mediante el método RMR y la obtención de datos con una brújula tipo Brunton, e interpretados por el programa Dips de Rocscience.

Finalmente se obtendrá un mapa de puntos de debilidad de la mina, un análisis técnico y análisis de costos actuales en minería, de los materiales para realizar la posterior implementación de un sistema de fortificación que mejor se pueda adaptar a una minera ornamental.

ÍNDICE

RESUMEN	#
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA.....	#
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVO GENERAL.....	11
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	11
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES GENERALES: CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO Y VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA TRONADURA...13	
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MINA.....	15
1.1.1 Ubicación y características generales.....	15
1.1.2 Dimensión.....	15
1.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA EN MINA QUINTAY.....	16
1.2.1 Roca de caja.....	16
1.2.2 Margen geológico.....	17
1.2.3 Mineralizaciones	18
1.2.4 Hidrología.....	22
1.2.5 Geomecánica.....	23
1.3 EXPLOSIVOS EN ROCA ORNAMENTAL.....	33
1.3.1 Definición de explosivo.....	33
1.3.2 Explosivo utilizado para macizo rocoso Quintay.....	34
1.3.3 Tipos de tronadura.....	34
1.3.4 Variables en la generación de vibración.....	35
1.3.5 Factores que tienen efecto sobre la vibración.....	35
1.3.6 Iniciación y fragmentación de explosivo.....	36
1.3.7 Vibraciones y ondas.....	36
1.3.8 Cálculo cantidad de explosivo.....	38
CAPÍTULO 2 TIPOS DE FORTIFICACIÓN: SISTEMAS SU CALIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES.....41	
2.1 DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN.....	43
2.2 LUGARES DE APLICACIÓN PARA FORTIFICACIÓN.....	43
2.3 DISEÑO Y RECONOCIMIENTO DE LUGARES PELIGROSOS.....	44
2.4 TIPOS DE FORTIFICACIÓN.....	45
2.4.1 Fortificación.....	45
2.5 FORTIFICACIÓN POR PERNOS.....	46

2.5.1 Anclaje mecánico.	46
2.5.2 Anclaje cemento resina.	47
2.5.3 Lechada cemento/perno resina.	47
2.5.4 Tipos de pernos.	48
2.5.5 Acompañamiento.	50
2.5.6 Mallas de fortificación.	51
2.5.7 Ventajas y desventajas	53
2.6 RESISTENCIA MATERIAL DE SISTEMAS DE FORTIFICACIÓN.	53
2.6.1 Pernos.	54
2.6.2 Mallas.	56
2.6.3 Planchuelas.	57
2.6.4 Resinas.	59
2.6.5 Cemento lechada	60
2.6.6 Accesorios y repuestos.	60
2.7 PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS.	62
2.8 ANÁLISIS DE MATERIALES.	65
CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN DE PROPUESTA Y DESARROLLO: MEDICIONES Y FACTORES.	69
3.1 PROPUESTA DE FORTIFICACIÓN.	69
3.2 FACTORES DE DESPRENDIMIENTO.	69
3.3 ZONAS DE PELIGRO.	69
3.3.1 Zona de tronadura	70
3.3.2 Presencia de fallas.	70
3.4 DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN / RUMBO Y MANTEO.	71
3.5 FALLAS Y MEDICIONES MINA QUINTAY.	71
3.5.1 Programa para estudio de fallas.	73
3.5.2 Conversión y grafica de interpretación.	73
3.6 ELECCIÓN ZONA DE FORTIFICACIÓN.	76
3.7 ANÁLISIS DE ELEMENTOS A UTILIZAR.	76
3.7.1 Perno.	77
3.7.2 Malla.	79
3.8 ANÁLISIS DE COSTO Y PROPUESTA FINAL.	80
3.9 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.	82
4 BIBLIOGRAFÍA.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Elaboración propia en base a instalaciones de faena en minera Quintay..15
Figura 1-2	Elaboración propia en base a instalaciones de faena en minera Quintay..16
Figura 1-3	Bancos de la minera Quintay.....17
Figura 1-4	Mapa geológico Valparaíso 1996.....18
Figura 1-5	Biotita.....19
Figura 1-6	Cuarzo.....19
Figura 1-7	Feldespato.....19
Figura 1-8	Turmalina.....20
Figura 1-9	Tonalita.....20
Figura 1-10	Moscovita.....21
Figura 1-11	Depósito de agua, fondo mina.....22
Figura 1-12	Ubicación de los perfiles de levantamiento geomecánico.....23
Figura 1-13	Sostenimiento en base a Q de Barton.....29
Figura 1-14	Diagrama de tiros en talud.....35
Figura 1-15	Parámetros de una onda en movimiento armónico.....37
Figura 1-16	Tipo de ondas terrestres a partir de un sismo.....38
Figura 2-17	Inclinación correcta de pernos de anclaje.....44
Figura 2-18	Perno con tuerca anclado mecánicamente.....47
Figura 2-19	Perno con resina o lechada.....48
Figura 2-20	Perno Split sets.....48
Figura 2-21	Perno Swellex plegado y con inyección de presión.....49
Figura 2-22	Swellex vista general.....49
Figura 2-23	Perno helicoidal o barra helicoidal con planchuela y tuerca.....50
Figura 2-24	Tipos de planchuela.51
Figura 2-25	Malla electrosoldada.....51
Figura 2-26	Malla trenzada.....52
Figura 2-27	Planchuelas por catálogo Mining rock.....58
Figura 2-28	Barra de resina marca Remicsa.....59
Figura 2-29	Tuerca acero, cabeza expansión, separadores, barril y cuña.....60
Figura 2-30	Operador barrenando para la instalación de explosivo.....61
Figura 3-31	Fallas identificables en minera Quintay pared Sureste de la mina.70
Figura 3-32	Concepto rumbo, dirección de inclinación y manteo.....71
Figura 3-33	Obtención de rumbo y manteo con brújula Brunton.....72
Figura 3-34	Sistema de falla N°1.....72

Figura 3-35	Proyección estereográfica de concentración en zonas de mayor debilidad mina Quintay.....	75
Figura 3-36	Vista aérea de mina Quintay, ubicación de fallas.....	75
Figura 3-37	Paredes de la mina divididas en cuatro sectores.	76
Figura 3-38	Goteo de agua pared sur de la mina.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1	Dureza de Mohs en resistencia a la compresión.....	21
Tabla 1-2	Ejemplos minerales según clasificación de Mohs.....	21
Tabla 1-3	Clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas por de índices de campó.....	24
Tabla 1-4	Caracterización macizo rocoso método GSI.....	26
Tabla 1-5	Índice de calidad y n° de familias.....	27
Tabla 1-6	Rugosidad y alteración de juntas.....	28
Tabla 1-7	Reducción por agua en las juntas.....	28
Tabla 1-8	Factores de reducción de esfuerzos.....	29
Tabla 1-9	Sistemas de clasificación del macizo rocoso.....	30
Tabla 1-10	Parámetros de Bieniawski.....	32
Tabla 1-11	Clase y calidad de la roca según puntuación RMR.....	32
Tabla 1-12	Resumen de los perfiles con su Geomecánica de mina Quintay.....	33
Tabla 2-13	Perno lechada cemento/resina.....	52
Tabla 2-14	Perno Split sets / perno Swellex.....	53
Tabla 2-15	Mallas de fortificación.....	53
Tabla 2-16	Barra helicoidal.....	54
Tabla 2-17	Resistencia perno Split sets.....	54
Tabla 2-18	Perno auto-perforante características.....	55
Tabla 2-19	Perno cable características.	56
Tabla 2-20	Perno Swellex características.	56
Tabla 2-21	Malla electro soldada características.	57
Tabla 2-22	Malla tejida características.	57
Tabla 2-23	Planchuela características.	58
Tabla 2-24	Características diámetros de perforación para resina.....	59
Tabla 2-25	Descripción equipo de perforación.	61
Tabla 2-26	Consulta de materiales.	65
Tabla 3-27	Transformación DipDirection.	73
Tabla 3-28	Resumen de datos.	74

Tabla 3-29	Análisis de costos.....	80
------------	-------------------------	----

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 2-1	Accidentados por región.	62
Gráfico 2-2	Trabajadores fallecidos distribuidos por meses.	63
Gráfico 2-3	Distribución de fallecidos por categoría de faena.	63
Gráfico 2-4	Tipo de accidente.	64
Gráfico 2-5	Accidente más recurrente	64

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

SIGLAS:

N: Norte

S: Sur

E: Este

W: Oeste

Msnm: Metros sobre el nivel del mar

RBO: Rumbo

Sernageomin: Servicio Nacional de Geología y Minería

RMR: Rock Mass Rating

RQD: Rock Quality Designation

ASTM: American Society of Testing Materials (asociación americana de ensayo de materiales)

SAE: Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores)

AISI: American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero)

NCh: Norma Chilena

ISO: International Organization for Standardization (Organización internacional de normalización)

Enaex: Empresa nacional de explosivos.

Enami: Empresa nacional de minería.

Factor de carga: Determina la cantidad de explosivo utilizado por cada metro cúbico o tonelada de roca fragmentada.

Presión de detonación: Propiedad de un explosivo para romper la roca.

Afloramiento: Exposición en la superficie de la roca base, a través de la cubierta del suelo o material fragmental.

Botada: (Burden) En voladura, es la mínima distancia de un tiro, o de una parada de tipos hacia la cara libre.

SIMBOLOGÍA:

%: Porcentaje.

MT: Metros.

MPa: Mega pascales.

Kbar: Kilobar.

Plg: Pulgada.

<: Menor que.

>: Mayor que.

Km: kilómetros.

Mm: Milímetros.

INTRODUCCIÓN

En los procesos productivos de la minería, la fragmentación del mineral es parte fundamental al momento de realizar alguna labor, para lo cual es necesaria la utilización de elementos explosivos, iniciadores y accesorios entre otros, que producen alteraciones en el terreno como lo son las vibraciones, ondas y desprendimiento de rocas. Es muy común ver desprendimientos puntuales de material fragmentado entre bancos, en especial en minería de rajo abierto, esto es un problema para la seguridad del personal, tanto como para las maquinarias presentes en la faena. Esto podría evitarse con la adecuada implementación de un sistema de seguridad preventivo, el cual pueda evitar la caída de material fragmentado producto de las vibraciones de las tronaduras.

De acuerdo con el Sernageomin entre 2000 y 2018 los accidentes asociados a desprendimientos de roca provocaron 161 trabajadores fallecidos, lo que presenta el 32% de la fatalidad en el sector y la principal causa de muerte en el rubro. Para esto El reglamento de seguridad minera establece el marco regulatorio que es obligación en la industria de la minería:

Capítulo primero Art. 1: *Proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha industria y de aquellas que bajo circunstancias específicas y definidas están ligadas a ella; Proteger las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras, y por ende, la continuidad de los procesos.*

Un desprendimiento de roca puede ocasionar un accidente, lo cual podría llegar a provocar un corte momentáneo de caminos y dependiendo de la magnitud de la mina y del desprendimiento, incluso pérdidas o lesiones de operarios ubicados en el sector de desprendimiento, basado en estudios de Sernageomin sobre accidentabilidad minera y la normativa de seguridad minera, capítulo quinto y sexto, sobre perforación y fortificación.

Este trabajo está dirigido para la pequeña minería, puesto que en variadas ocasiones no se presentan medidas de seguridad para el ámbito de taludes con desprendimiento, como es el caso de la minera ornamental de Quintay, no posee control de roca fragmentada, tiene presencia de fallas, goteo de agua y tronaduras de avance sin control de vibraciones según la calidad de roca.

Teniendo en cuenta las características mencionadas, se propone una fortificación temporal de talud, complementando con la información obtenida de informes geológicos, investigación en sitios web, mediciones en terreno y programa de medición de fallas, para identificar las zonas de debilidad y evitar algún tipo de accidente de desprendimiento de material.

OBJETIVO GENERAL

- Proponer un sistema de fortificación temporal en taludes con menor calidad de roca, según parámetros geomecánicos y vibraciones inducidas mediante tronaduras, con la finalidad de minimizar el daño al macizo rocoso y evitar caídas puntuales de material fragmentado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar características del macizo rocoso en la minera de interés, según datos geológicos, buscando parámetros de vibración y puntos críticos que afecten a la roca de mala calidad.
- Caracterizar alternativas de fortificación, a través de una comparación de sus propiedades más significativas, asegurando la calidad del talud según parámetros de RMR.
- Evaluar técnica y económicamente la propuesta de fortificación, según antecedentes geológicos, sistema de vibraciones y costos asociados, determinando la factibilidad de implementación.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES GENERALES:
CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO Y VIBRACIONES INDUCIDAS
POR LA TRONADURA.

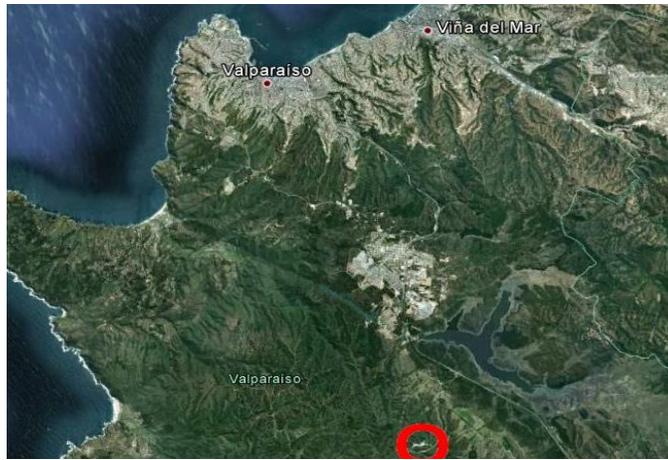
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MINA

En esta sección del primer capítulo, nos encontramos con las características de la minera en ubicación y dimensionamiento del rajo ornamental.

1.1.1 Ubicación y características generales.

Minera Quintay es una mina a rajo abierto, ubicada en dirección sureste de Valparaíso, a 5km aproximados al sur de la localidad de Peñuelas, camino F-800 al límite entre Casablanca y Valparaíso, a una altura de 500 msnm aproximadamente.

Su principal mineral de interés económico es el feldespató potásico u Ortoclasa y el cuarzo, utilizados en la industria de cerámicas entre otros usos.



Fuente 1: Google Maps.

Figura 1-1 Elaboración propia en base a fotografía, ubicación minera Quintay.

1.1.2 Dimensión.

Mina Quintay al ser de rajo abierto, está en constante expansión, siendo una faena levemente ovalada de un aproximado de 150 metros de diámetro en su distancia más larga y con una profundidad de 70 metros aproximados, desde la parte superior de este rajo.



Fuente 2: Google Maps.

Figura 1-2 Elaboración propia en base a instalaciones de faena en minera Quintay.

En esta ilustración podemos identificar el camino F800 que se dirige a Quintay, de igual manera por numeración encontramos el rajo o punto de extracción (1), las oficinas y campamento (2) y por último una cancha de acopio para el material extraído de la mina (3).

1.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA EN MINA QUINTAY

La geología es una parte fundamental de un yacimiento, ya que a través de esta información, se pueden reconocer datos de la roca que constituye el yacimiento, las mineralizaciones, márgenes geológicos y la hidrología de la zona.

Contando con los datos podremos realizar una caracterización de roca mediante el método RMR de Bieniawski.

1.2.1 Roca de caja.

La roca principal del yacimiento de feldespato y cuarzo, corresponde a una roca plutónica de la unidad Sauce.

Donde se observa cuarzo y feldespato (Ortoclasa) en cantidades similares, además abundante cantidad de biotita, lo que en conjunto da un color gris oscuro a la roca en sí. Al mirar de una distancia considerable tiene un aspecto de color gris/café. En base de observaciones de terreno, es clasificada esta roca como tonalita mezclada con mineral de biotita, las que demuestran un color café/dorado en los bordes.

Debido a procesos de meteorización química la roca se presenta bastante afectada. La plagioclasa se presenta relativamente blanda, con características indicadores de cierto grado de sericitación, por la presencia de granos finos de micas blancas tipo moscovita. En partes de la roca se observan colores café/rojizos, que son denominantes a la oxidación de minerales máficos como la hornablenda, entre otros minerales.

La roca demuestra un gran grado de deterioro de modo tal, que se desgrana fácilmente con un golpe de martillo, incluso se desprende con fuerza humana. En su grado de meteorización, se considera esta roca como típica y característica de roca plutónica de la cordillera de la costa.

En partes se observan zonas de bolones dentro de la roca de mayor dureza. La información verbal comunicada por los mismos trabajadores de la faena, indica que se trata de una roca muy dura y con buena resistencia, misma información coincide con las observaciones de los bolones de menor dimensión que se observan en forma ocasional, fuera de la zona de la mina y corresponde a partes de tonalita con una meteorización menos avanzada.

Debido al deterioro de estructuras, se puede identificar con bastante claridad las fallas o diaclasas en la roca. Donde es posible ver dichas fallas, tiene una orientación parecida a lo observado desde la distancia en la pared Sureste del rajo, aquí se observan planos bien desarrollados que se juntan entre sí, formando cuñas en la roca. Ver Figura 1-3.



Fuente 3: Foto propia.

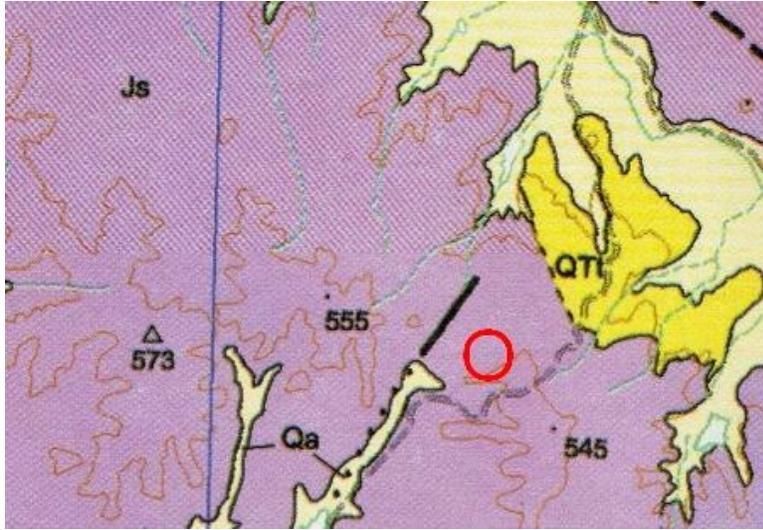
Figura 1-3 Bancos de la minera Quintay

1.2.2 Margen geológico.

Esta minera está formada principalmente por rocas magmáticas, plutónicas o intrusivas, por el hecho de estar ubicada en la cordillera de la costa de Valparaíso.

En base a un informe geológico presentado, las rocas pertenecen al periodo mesozoico en los tramos de Valparaíso y Casablanca, mientras que en las localidades cercanas como lo es Algarrobo, predominan las rocas del periodo paleozoico.

Las rocas de las cercanías de minera Quintay, corresponden a rocas intrusivas de la unidad Sauce. Según mapa geológico de Valparaíso-Curacaví (1996), la unidad está formada principalmente por dioritas cuarcíferas de piroxeno-hornblenda-biotita y tonalitas de hornblenda –biotita (presencia de Ca, Mg, Fe, Mn, Na, Li, Al, Cr, Sc, Ti, K), de una edad no mayor a 163 mil años. Ver Figura 1-4.



Fuente 4: Mapa geológico del área de Valparaíso-Curacaví 1996.
Extraído Informe geológico mina

Figura 1-4 Mapa geológico Valparaíso 1996.

Simbología:

- Qa: Cuaternario; depósitos aluviales no consolidados (grava y arena)
- QTt: Cuaternario, Terrazas de abrasión (arena)
- Js: Jurásico; Unidad Sauce (diorita cuarcífera y tonalita)
- Líneas negras gruesas: fallas
- El círculo rojo indica la ubicación de la mina Quintay.

1.2.3 Mineralizaciones

La roca de un interés económico está formada por cuarzo macizo de diferentes tipos de color y variedades de feldespatos potásicos. La zona mineralizada es un tipo de manto, con un techo mineral irregular como por ejemplo la presencia de biotita ubicada aproximadamente a 25 o 30 metros por debajo de la superficie original.

Tanto en la parte Este de la mina como en el fondo de esta, se encontró una roca que aparte de los minerales de interés económico, contiene una cantidad abundante de biotita y ocasionalmente moscovita entre vetas de turmalina. Estas zonas serán posteriormente explotadas y se extienden hacia el Este y hacia la profundidad, con una distancia desconocida. Mientras que los sectores sujetos a explotación, se limitan a roca formada solamente de cuarzo y feldespatos.

1.2.3.1 Biotita

Mineral del grupo de silicatos, subclase filosilicato, encontrado generalmente en rocas ígneas o metamórficas, especialmente granito. Se caracteriza por tener una forma de capas delgadas que se encuentran superpuestas una sobre otra, siendo muy frágiles de manera que se pueden separar con la mano.

Características físicas		
Dureza	2,5 a 3 en escala de Mohs	
Raya	Gris negra	
Color	Negro, pardo o verdoso	
Magnetismo	No	
Brillo	Vítreo, perlado	

Fuente 5: <https://afly.co/fdd3>

1.2.3.2 Cuarzo

Segundo mineral más abundante en la corteza terrestre, pertenece a los silicatos, compuesto principalmente de sílice, se destaca su resistencia a la meteorización, con la dureza tal de rayar vidrio y aceros comunes. Se presenta en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Características físicas		
Dureza	7 escala de Mohs	
Raya	Blanca	
Color	Transparente, blanco o rosa	
Magnetismo	No	
Brillo	Vítreo	

Fuente 6: <https://afly.co/fdc3>

1.2.3.3 Feldespato

Los feldespatos son un grupo de minerales que forman parte de la familia de los silicatos, hay de 2 tipos, potásico (Ortoclasa) y sódico (Plagioclasa), con subclase tectosilicato. Es el mineral más abundante en la corteza terrestre con una abundancia del 60%. Son el componente principal de las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.

Características físicas		
Dureza	4,5 escala de Mohs	
Raya	Blanca	
Color	Blanco, amarillento, naranjada	
Magnetismo	No	
Brillo	Mate	

Fuente 7: <https://afly.co/fdb3>

1.2.3.4 Turmalina

Mineral correspondiente a la clase de los silicatos (Clase VIII) y perteneciente al grupo de los ciclosilicatos. Es de origen magmático y se puede encontrar en rocas plutónicas.

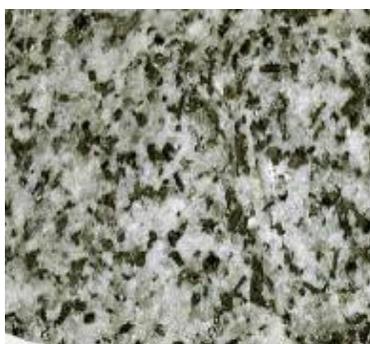
Características físicas		
Dureza	7 escala de Mohs	
Raya	Marrón	
Color	Negro, azul, marrón, incolora	
Magnetismo	Si	
Brillo	Vítreo	

Fuente 8: <https://afly.co/fdg3>

1.2.3.5 Tonalita

Es una roca ígnea plutónica que se caracteriza por la abundancia de cuarzo, plagioclasa y biotita. Se forma por la cristalización de un material que estaba fundido (magma) que sale a la superficie debido al tectonismo o a la erosión.

La dureza estará determinada por la variación en la abundancia de los minerales presentes, pero generalmente es una roca medianamente dura y se caracteriza por tener textura fanerítica de grano medio a grueso. Por lo que tiene buena resistencia a la compresión.



Fuente 9: <https://afly.co/fdm3>

1.2.3.6 Moscovita

Mineral del grupo de los silicatos, subclase filosilicato y perteneciente al subgrupo de las micas lumínicas. Es la especie más común del grupo de las micas, es también, conocida como mica potásica. Ver tabla 1-1.

Características físicas		
Dureza	2 a 2,5 escala de Mohs	
Raya	Blanca	
Color	Incoloro, plateada, verde claro	
Magnetismo	No	
Brillo	Vítreo o perlado	

Fuente 10: <https://afly.co/fdp3>

Para la clasificación según dureza de los minerales, se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 1-1 Dureza de Mohs en resistencia a la compresión.

Clasificación	Dureza MOHS	Resistencia a la compresión Simple (Mpa)
Muy Dura	+7	+200
Dura	6-7	120-200
Medio Dura	4,5-6	60-102
Medio Blanda	3-4,5	30-60
Blanda	2-3	10-30
Muy Blanda	1-2	-10

Fuente: -EIS proyecto de explotación cantera GNL2 Cañete-Perú

Tabla 1-2 Ejemplos minerales según clasificación de Mohs.

Dureza	Mineral	Comentario
1	Talco	Se raya con la uña
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad
3	Calcita	Se raya con moneda de cobre

4	Fluorita	Se raya con cuchillo
5	Apatito	Se raya difícilmente con cuchillo
6	Ortoclasa	Se raya con lija de acero
7	Cuarzo	Raya el vidrio
8	Topacio	Raya a todas los anteriores. Esmeralda
9	Corindón	zafiros y rubíes son formas de corindón
10	Diamante	Mineral natural más duro

Fuente 11: <https://www.rocasym minerales.net/escala-de-mohs/>

1.2.4 Hidrología.

En la zona de mineralización, al fondo del rajo se puede observar una concentración de agua, ubicada por un goteo probablemente producido por el corte de napas subterráneas, la cual debido a la estructura de la roca, el agua se desplaza entre las fracturas del mineral impermeable (cuarzo y feldespato). A esto agregamos que durante periodos invernales debido a la zona geográfica, se generan condensaciones y precipitaciones.

Sin embargo, el agua filtrada al rajo es reducida, casi a su totalidad gracias a evacuaciones con bombas hidráulicas, por lo cual no se ve afectada la extracción de mineral. Ver Figura 1-11.



Fuente 12: Foto propia tomada en terreno

Figura 1-11 Depósito de agua, fondo mina.

1.2.5 Geomecánica.

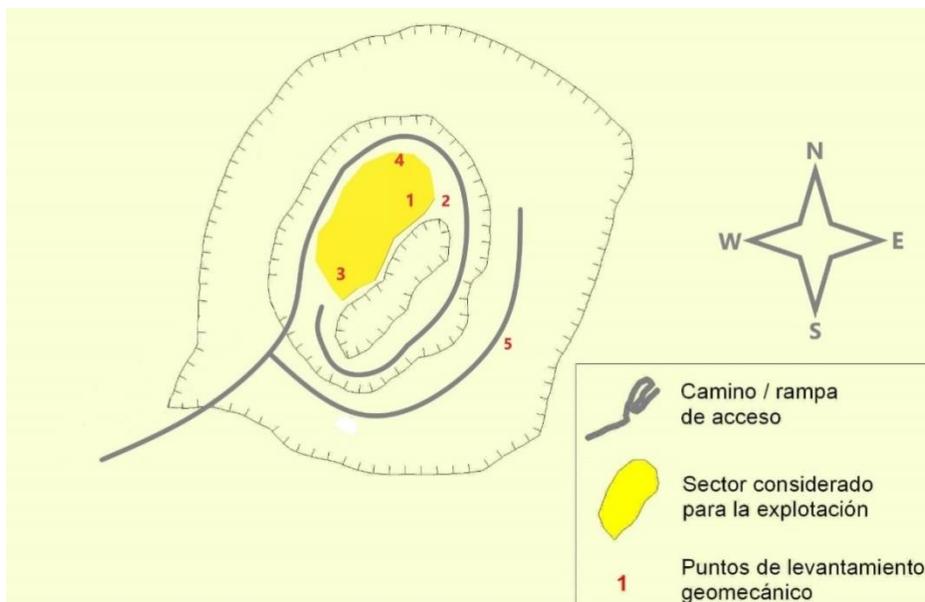
Las propiedades Geomecánicas de las rocas son el resultado de su composición mineralógica, historia geológica, deformaciones y meteorización generados con el paso de los años. La gran variabilidad de dichas propiedades se ve reflejada en los comportamientos mecánicos diferentes, que tendrá cuando se le aplique una fuerza externa.

Se realizó un levantamiento geomecánico según el método de Bieniawski, RMR. Este análisis se realizó en un total de cinco perfiles diferentes. Debido a las características del lugar, específicamente debido a que los accesos a los afloramientos de roca, son lo suficientemente extensos para realizar la examinación, estos perfiles se ubican en su mayoría en paredes del rajo o cerca de ellas.

Cuatro de los perfiles estudiados (N° 1 al 4. En Figura 1-12) corresponden a la zona mineralizada (roca de cuarzo-feldespato).

El último perfil (N° 5. En Fig. 1-12) se levantó en un banco dentro de la roca estéril (tonalita meteorizada de la roca de caja).

El perfil N°2 se encuentra en el límite de la roca mineralizada (mayor presencia de biotita).



Fuente 13: Elaboración propia

Figura 1-12 Ubicación de los perfiles de levantamiento geomecánico.

1.2.5.1 Parámetros de resistencia.

El parámetro de resistencia de matriz rocosa se estimó en todos los perfiles mediante índices de campo, aplicando lo siguiente: Ver Tabla 1-3.

Tabla 1-3 Clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas por de índices de campo.

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple(MPa)
S1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	<0,025
S2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025 - 0,05
S3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05 - 0,1
S4	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1 - 0,25
S5	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse la uña.	0,25 - 0,5
S6	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 - 1,0
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 - 5,0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0 - 25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte de martillo.	25 - 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50 - 100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100 - 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	>250

Fuente 14: González de Vallejo, L., et al., (2002). Ingeniería geológica, Pearson Education, Madrid.

1.2.5.2 Sistema de clasificación del macizo rocoso

Debido a la complejidad que presentan los macizos rocosos, diversos autores han intentado establecer sistemas de clasificación. Muchos de estos métodos han mejorado con el tiempo. El propósito de los sistemas de clasificación es calificar de manera cuantitativa la calidad geotécnica de un macizo rocoso, permitiendo la distinción entre un macizo y otro de manera rápida y fácil. Ayudan a tener un parámetro para efectos de diseño de fortificación y se basan en apreciaciones empíricas.

Hay que tener en cuenta que son subjetivos, a mayor experiencia mejor es la clasificación y siendo que se basan en ratings, en que se asigna un puntaje por características y se calcula un estimado final.

Algunos sistemas de clasificación:

- Terzaghi.
- RQD de Deer.

- RMR de Bieniawski.
- Método Q de Barton.
- GSI de Hoek y Brown.

Método GSI

El índice de resistencia geológica GSI o método de clasificación GSI, es una caracterización de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, a través de una identificación visual de las propiedades geológicas a nivel estructural.

La determinación de los parámetros GSI se diferencia de la clasificación RMR y Q de Barton, por tener una base de evaluación cualitativa y no cuantitativa como lo son los otros métodos. El método se creó para estimar propiedades contemplando aquellas rocas de baja calidad con un RMR menor a 20 de puntuación.

El método es presentado por Hoek en 1995, para el criterio de falla generado en roca y que con RMR es poco representativo en rocas débiles, en cambio los valores obtenidos por el método GSI, son más acertados creado para representar roca buena, media, mala y muy mala calidad.

Este índice tiene valores desde 1 a 100, en el cual los valores más pequeños corresponden a macizos más débiles o de menor calidad, donde su superficie se encuentra visiblemente meteorizada y altamente fragmentada, en cuanto los valores más altos son para roca con buena estructura sin superficie afectada.

La determinación es mediante una tabla a la que se ingresa desde 2 puntos de vista, vertical u horizontal. Al converger estos puntos dan un valor numérico con el cual se puede ingresar ecuaciones empíricas, para la estimación de las propiedades de la masa rocosa. Ver Tabla 1-4.

Tabla 1-4 Caracterización de un macizo rocoso por el método GSI

INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000)		CONDICIONES DE SUPERFICIE				
Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	POBRE	MUY POBRE
		Superficie muy rugosa, no meteorizada, fresca	Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos compactos.	Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos de arcillas suaves.
ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →				
	INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas	90			N/A	N/A
	FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de discontinuidades	80				
	MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrelazados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas		70			
	FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion			60		
	DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados				50	
	LAMINADA/FOJADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla					40
		DECRECE EL ENCLAVAMIENTO DE LOS BLOQUES ↓				
					30	
						20
		N/A	N/A			10

Fuente 15: <https://n9.cl/za29k>

Clasificación del método Q de Barton

Es una clasificación geomecánica de los macizos rocoso desarrollada por Barton (1974), que permite obtener parámetros de resistencia y deformabilidad y estimar sostenimiento de pared. El índice Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros, dados por la expresión:

$$Q = (RQD / J_n) * (J_r / J_a) * (J_w / SRF)$$

Donde;

- Rock Quality Design (RQD).
- Numero de familia de juntas o discontinuidades (Jn).
- Rugosidad de las juntas (Jr).
- Grado de alteración de las juntas (Ja).

- Presencia de agua (Jw).
- Estado tensional de la roca, Stress Reduction Factor (SRF).

Estos factores se pueden simplificar en 3 características, (RQD/Jn) en tamaño de los bloques, (Jr/Ja) en la resistencia al corte entre bloques y (Jw/SRF) en la influencia del estado tensional.

El índice Q obtenido varía entre 0,001 y 1.000, clasificando macizo rocoso como excepcionalmente malo o bueno.

Para poder realizar el cálculo, necesitamos de tablas las cuales se mostrarán a continuación:

Tabla 1-5 Índice de calidad y n° de familias.

DESCRIPCIÓN	VALOR	NOTAS
1. ÍNDICE DE CALIDAD DE ROCA	RQD (%)	
A. Muy mala	0-25	1. Cuando se obtienen valores del RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el índice Q. 2. Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90 etc., tienen suficiente precisión.
B. Mala	25-50	
C. Regular	50-75	
D. Buena	75-90	
E. Excelente	90-100	
2. NUMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS	Jn	NOTAS
A. Masivo o con pocas juntas	0.5-1.0	1. En intersecciones de túneles se utiliza la expresión (3.0 x Jn) 2. En las bocaminas de los túneles se utiliza la expresión (2.0 x Jn)
B. Una familia de juntas	2	
C. Una familia de juntas + una aislada	3	
D. Dos familias de juntas	4	
E. Dos familias de juntas + una aislada	6	
F. Tres familias de juntas	9	
G. Tres familias y algunas juntas aleatorias	12	
H. Cuatro familias, juntas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15	
I. Roca triturada, terrosa.	20	

Fuente 16: <https://n9.cl/zmyf>

Tabla 1-6 Rugosidad y alteración de juntas

3. RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS		Jr		
a) Contacto con las paredes			1. Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y a escala intermedia, por este orden.	
b) Contacto con las paredes antes de un corte de 10 cm				
A. Juntas sin continuidad		4		
B. Rugosa e irregulares, onduladas		3		
C. Lisa, ondulantés		2		
D. Pulidas, ondulantés		1.5		
E. Rugosas o irregulares, planares		1.5		
F. Lisas, planares		1.0		
G. Pulidas, planares		0.5		
c) Sin contacto con roca después de corte de 10 cm			1. Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3m, se debe aumentar el inde Jr, en una unidad. 2. En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor Jr=0.5.	
H. Zonas que contienen minerales arcillosos, de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes.		1.0		
I. Zona arenosa, gravosa o de roca triturada, de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes.		1.0		
4. ALTERACIÓN DE LAS JUNTAS		Ja	ϕ_r , grados aproximadamente	
a) Contacto con las paredes de roca			1. Los valores de ϕ_r , ángulo de fricción residual, dan una guía aproximada de las propiedades mineralógicas de los productos de alteración, si éstos están presentes.	
A. Relleno soldado, duro, inablandable, impermeable.		0.75		
B. Paredes de juntas inalteradas, sólo con manchas de oxidación.		1.0		(25°-30°)
C. Paredes ligeramente alteradas, con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca desintegrada o no arcillosa.		2.0		(25°-30°)
D. Recubrimientos limosos o arenoso-arcillosos, con una pequeña fracción de arcilla (inablandable).		3.0		(20°-25°)
E. Recubrimientos ablandables o con arcilla de baja fricción o sea kaolinita o mica. También dorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas (recubrimiento discontinuo de 1-2 mm de espesor menos)		4.0		(8°-16°)

Fuente 17: <https://n9.cl/zmyf>

Tabla 1-7 Reducción por agua en las juntas

5. REDUCCIÓN POR AGUA EN LAS JUNTAS	Jw	Presión aproximada del Agua (Kgf/cm ²)	
A. Excavación seca o flujos bajos (<5 L/min localmente)	1.0	<1.0	Nota: 1. Los factores C hasta F son estimaciones imprecisas. Aumentar Jw, si se instala drenaje. 2. Los problemas especiales causados por la presencia de hielo no se toman en consideración.
B. Flujo o presión medias, con lavado ocasional de los rellenos.	0.66	1.0-2.5	
C. Gran flujo o presión alta en roca competente con juntas sin relleno.	0.5	2.5-10.0	
D. Gran flujo o presión alta, lavado considerable de los rellenos.	0.33	2.5-10.0	
E. Flujo o presión excepcionalmente altos con las voladuras, disminuyendo con el tiempo.	0.2-0.1	>10	
F. Flujo o presión excepcionalmente altos todo momento.	0.1-0.05	>10	

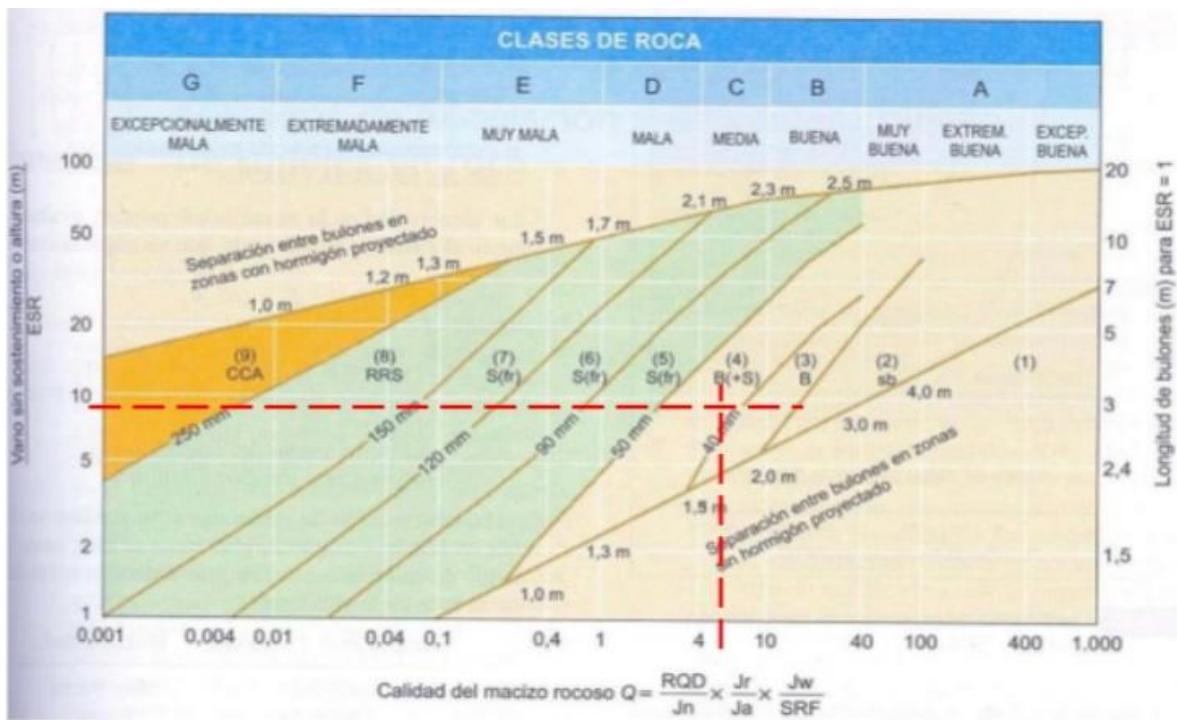
Fuente 18: <https://n9.cl/zmyf>

Tabla 1-8 Factores de reducción de esfuerzos

6. FACTOR DE REDUCCIÓN DE ESFUERZOS	SRF	NOTAS
a) Zonas de debilidad que intersectan la excavación y pueden ser las causas de que el macizo se desestabilice se construya el túnel.		
A. Múltiples zonas de debilidad con contenido de arcilla o roca químicamente desintegrada; roca circundante muy suelta (cualquier profundidad).	10.0	1. Reducir estos valores del SRF en un 25-50%, si las zonas relevantes influyen pero no intersectan la excavación.
B. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación <50m).	5.0	
C. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación >50m).	2.5	
D. Múltiples zonas de corte en roca competente (sin arcilla), roca circundante suelta (cualquier profundidad).	7.5	
E. Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación <50m).	5.0	
F. Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación >50m).	2.5	
G. Juntas abiertas sueltas, fisuración intensa (cualquier profundidad)	5.0	

Fuente 19: <https://n9.cl/zmyf>

Después de obtener todos los datos en parámetros del macizo rocoso, se puede posicionar en la siguiente ilustración de sostenimiento, según el índice de Q de Barton. Para obtener por tabla información sobre fortificación con separación de pernos después de una proyección de hormigón dependiendo del tipo de roca en caso de que sea necesario incorporar a la fortificación.



Fuente 20: <https://n9.cl/zmyf>

Figura 1-13 Sostenimiento en base a Q de Barton.

Tabla 1-9 Sistemas de clasificación del macizo rocoso.

Denominación del sistema de clasificación	Autor, año	País de origen	Aplicación
Protodyakonov	Protodyakonov, 1907 (5)	Países del Este	Túneles
Carga en rocas	Terzaghi, 1946 (6)	Estados Unidos	Túneles con sostenimiento de acero
Tiempo de auto estabilidad	Lauffer, 1958 (7)	Austria	Túneles
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1967 (8) y Deere, 1968 (9)	Estados Unidos	Túneles
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al., 1972 (10)	Estados Unidos	Túneles
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973 (11). (Bieniawski, 1989) ^a (1)	Sudáfrica	Túneles, minas, taludes y cimentaciones
Sistema Q	Barton et al., 1974 (12), (Barton and Grimstad, 1994) ^a (13)	Noruega	Túneles, cavernas
Geological Strength Index (GSI)	Hoek et al., 1995 (14)	Canadá	No aplicable a cálculos de sostenimiento. Caracterización de macizos rocosos (15)
Rock Mass index (RMI)	Palmström, 1995 (3) (16)	Noruega	Ingeniería de rocas
Rock Condition Rating (RCR) o RMR _{mod}	Sheorey, 1993 (17), Goel et al. 1996 (18), Kumar et al., 2004 (19)	India	Variante de RMR
N (o índice Q _{mod})	Sheorey, 1993 (17), Goel et al. 1996 (18), Kumar et al., 2004 (19)	India	Variante del sistema Q cuando SRF = 1.
Rock Mass Fabric Índices (F)	Tzamos and Sofianos, 2007 (20)	Grecia	Diagramas para obtener de manera simplificada los parámetros de los sistemas RMR, Q, GSI y RMI
Rock Mass Quality Index	Aydan et al., 2014 (21)	Japón - Turquía	Estimación de propiedades del macizo rocoso

Fuente 21: <https://n9.cl/fivl>

En la tabla mostrada anteriormente, se denominan los tipos de sistemas de clasificación de roca, mostrando el autor y año con un país de origen, demostrando cual es su aplicación. Donde comprendemos que para una minera a cielo abierto de pequeña envergadura es recomendable utilizar el método RMR, ya que la aplicación es para sostenimiento de taludes. Todos los sistemas de clasificación tienen el fin de estudiar y caracterizar el macizo rocoso, con la diferencia de ser cualitativos o cuantitativos aplicados para minería a rajo o subterránea mayoritariamente.

Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1979)

Este sistema de clasificación también llamado RMR, consiste en una metodología que permite hacer una clasificación de roca in situ, la suma de los valores encontrados para cinco factores, indicará el tipo de clase o macizo rocoso. La suma máxima de estos parámetros es 100, utilizada usualmente en taludes y construcción de túneles.

La clasificación toma en consideración:

a) Resistencia a la compresión simple de roca intacta, es decir, un esfuerzo máximo que puede soportar la muestra de roca bajo una carga de compresión.

b) El índice de RQD, que es la designación de la calidad de la roca, considerado un criterio bastante importante ya que permite seleccionar una fortificación.

La suma de los trozos de testigo mayor o igual a 10 cm, dividido por la barrenación y multiplicado en 100 nos deja el resultado en porcentaje.

$$RQD = \frac{\sum \text{de todos los trozos mayores o iguales a 10 cm} * 100}{\text{Longitud de barrenación en cm}}$$

c) Espaciado de las diaclasas, es una valoración del espaciamiento o separación entre discontinuidades. Si los espaciamientos son pequeños, la resistencia de la roca disminuye.

d) Naturaleza de diaclasas:

Abertura: es la distancia que separa las paredes sin relleno.

Longitud de discontinuidad: tamaño de la discontinuidad, área que ocupa dentro del macizo.

Rugosidad: es la medida de aspereza de la discontinuidad, aumenta la resistencia al corte.

Alteración: es el grado de fracturamiento que presenta una roca.

Relleno: característica del macizo que puede estar y no estar en la discontinuidad, que separa a la roca. Fundamental para comprender la cohesión del macizo rocoso y la resistencia.

e) Presencia de agua, puede acelerar el aflojamiento y producir deslizamientos por bloques.

Ver Tabla 1-10.

Tabla 1-10 Parámetros de Bieniawski

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		valor	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		valor	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		valor	15	10	7	4	0		

Fuente 22: Excavaciones subterráneas en roca Bienawski 1979.

1.2.5.3 Perfil de levantamiento según RMR.

Para la clasificación se utilizan las siguientes categorías:

Tabla 1-11 Clase y calidad de la roca según puntuación de RMR

Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Fuente 23: excavaciones subterráneas en roca Bienawski 1979.

En modo resumen, resultan las siguientes clasificaciones:

Tabla 1-12 Resumen de los perfiles con su Geomecánica de la mina Quintay.

Perfil (Punto en Figura 1-12)	Tipo de roca	Puntuación RMR	Clase / Calidad
Nº1	Feldespatos con cuarzo (límite de la zona destinada a explotación)	56	III / Media
Nº2	Feldespatos con cuarzo (límite de la zona destinada a explotación)	48	III / Media
Nº3	Feldespatos (límite de la zona destinada a explotación)	65	II / Buena
Nº4	Feldespatos (límite de la zona destinada a explotación)	51	III / Media
Nº5	Tonalita meteorizada (roca de caja)	25	IV / Mala

Fuente 24: Elaboración propia

1.3 EXPLOSIVOS EN ROCA ORNAMENTAL

Para la fragmentación en roca ornamental como por ejemplo calizas o cuarzos, se hace necesaria la utilización de explosivos, los cuales generan alteraciones como lo son las vibraciones, ondas y proyecciones de roca pueden originar daños de estructura al macizo rocoso.

La intensidad de las vibraciones puede causar algún tipo de daño a la roca expuesta ante dicha tronadura y todo varía de acuerdo a la carga del explosivo detonado, la distancia de espaciamiento, el tipo de explosivo y la cantidad.

1.3.1 Definición de explosivo.

El explosivo es aquella sustancia que por causa externa ya sea roce, calor o percusión entre otras, se transforma en gases liberando calor, presión o radiación en un tiempo muy breve. Existen diferentes tipos de sustancias explosivas y vienen en variados formatos, cantidades y distintos efectos de potencia en la explosión, como también existen distintas formas de detonarlos y aparatos para la activación remota o manual a distancia y con efecto controlado.

1.3.2 Explosivo utilizado para el macizo rocoso de minera Quintay.

Para la minera Quintay la utilización de explosivo es recurrente al ANFO, el cual consiste en una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, los porcentajes van del 90 al 97% de nitrato de amonio y del 3 al 10% de combustible, ejemplo 95% nitrato y 5% de queroseno.

Existe procedimiento para el traslado, uso del explosivo y eliminación de excedentes de acuerdo a la ley 17.798 (Ley de armas y explosivos).

1.3.3 Tipos de tronadura

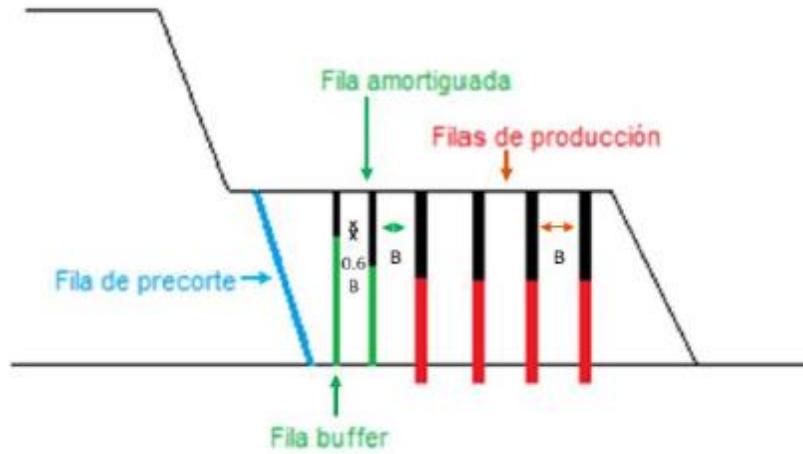
Las tronaduras producen daño al macizo rocoso circundante a la roca tronada, esto debido a la vibración de alta velocidad y baja frecuencia que genera grietas o aperturas, la acción de los gases que provocan un empuje en todas direcciones y desestabilización, debido a alteración de estructura geológica, lo cual lleva a que las tronaduras no solo deben ser diseñadas dependiendo del objetivo, sino que también se debe considerar el plazo temporal sobre el que se precisa el talud.

Existen 3 tipos de tronadura; de producción, de contorno y de remate, aplicables para minería subterránea como para rajo abierto.

La tronadura de producción es utilizada para la separación del mineral de interés del macizo, además de disminuir el tamaño de las rocas, asegurando una granulometría que facilite el transporte del material. Cabe mencionar que las tronaduras de producción se utilizan tanto en mineral como para estéril.

La tronadura de contorno es menos productiva y más costosa que una convencional, tiene como objetivo compensar los costes de saneo y mantenimiento de taludes, garantizando estándares de seguridad. Una de las características básicas de este método es la buena distribución de energía y control, actuando como filtro de vibración de alta frecuencia.

La característica de la tronadura de remate es que corresponde a la franja colindante a la línea de diseño, por lo que precisa que asegure un cuidado en el talud dado su mayor exposición temporal, es similar a una tronadura de contorno pero con un valor mucho más reducido en el factor de carga de explosivo. Teniendo antes, dos perforaciones buffer y línea de amortiguación, las cuales tienen cargas al 0,6% o menos para una amortiguación de vibraciones al momento de la tronadura.



Fuente25: Revista de seguridad Minera, año 2018.

Figura 1-14 Diagrama de tiros en talud.

1.3.4 Variables en la generación de vibración.

Las variables que influyen en las características de las vibraciones producidas en el macizo rocoso, son las mismas que determinan la eficiencia de la tronadura, las podemos dividir en controlables y no controlables.

1.3.4.1 Controlables y no controlables.

VARIABLES CONTROLABLES son aquellas relacionadas al diseño de perforación y tronadura, incluyendo la cantidad de carga explosiva por retardo, tipo y distribución del explosivo, tiempo de cada retardo y confinamiento de la carga explosiva.

Mientras que las variables no controlables, son determinadas por factores conductuales y de supervisión de perforación y tronadura, así como experticia del operador de perforación. Se incluyen variables como la ubicación de la tronadura, el viento y condiciones climáticas. Cabe mencionar la desviación respecto a la perforación, ya que una desviación de acuerdo al diseño de detonación, puede alterar o modificar físicamente las cargas explosivas cercanas, y en caso extremo inducir la detonación prematura sólo por el poder explosivo de detonación por simpatía.

1.3.5 Factores que tienen efecto sobre la vibración

La tronadura tendrá un requerimiento de desempeño como la fragmentación, logro de piso, nivel de vibraciones o emisión de material particulado. Estos requerimientos de desempeño se pueden lograr mediante el ajuste de factores de diseño.

*Borde.	*Energía del explosivo.
*Espaciamiento.	*Precisión de iniciador.
*Profundidad del taco.	*Angulo de la cara con respecto a la estructura
*Material del taco.	*Número de barrenos.
*Altura del banco.	*Factores geológicos.
*Tipo de roca.	*Número de reforzadores.
*Propiedades físicas de la roca.	

1.3.6 Iniciación y fragmentación de explosivo.

Los iniciadores tienen la misión de proporcionar la energía necesaria para iniciar la reacción de la detonación, dentro del explosivo. El iniciador en minería corresponde al cordón detonante o booster-detonador.

-El booster es una carga explosiva potente, que tiene como función completar el trabajo de iniciación permitiendo la prolongación, son sensibles al impacto y fricciones.

-El detonador es el alto poder explosivo que inicia la detonación del booster, puede ser eléctrico, no eléctrico o electrónico. Cuanto mayor es la presión de detonación, mayor es la disponibilidad para la iniciación.

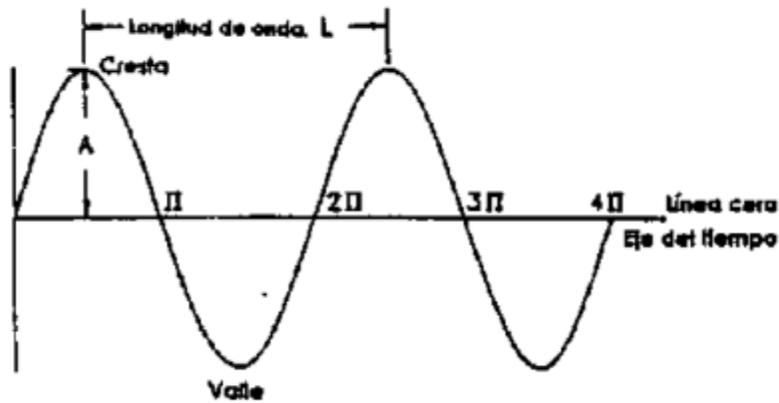
Los explosivos encartuchados sólo necesitan el cordón detonante mientras que los explosivos a granel, vaciables o bombeables, necesitan hacer un cálculo de detonación para entregar su máxima energía (cálculo en anexos). En métodos de gran envergadura, se utiliza detonación a distancia, con control electrónico en donde los tiempos de inicio y retardo son más controlados.

1.3.7 Vibraciones y ondas.

Cuando un explosivo detona, su energía química es convertida en alta temperatura y gas, que al estar confinado, esta reacción que se realiza en fracciones de segundo produce altas presiones, que pueden llegar a alcanzar 18.000 atm en las paredes de la perforación. La fragmentación corresponde al resultado químico físico resultante de la reacción termoquímica que experimenta un explosivo, y produce un impacto en el macizo rocoso donde la energía es transmitida en ondas de choque o esfuerzo de compresión y en la presión o empuje de gas.

Al quebrarse una roca solo el 50% de la potencia explosiva se transforma en trabajo útil, el resto de la energía se libera en forma de calor, vibraciones y energía acústica (Rascheff y Goemas creadores de un modelo teórico que confirma dicho escape de energía por ondas de choque, experimento en anexo).

Las propiedades fundamentales que describen el movimiento de ondas se denominan parámetros de ondas, estos se miden al analizar movimiento de ondas o vibración.



Fuente26: Revista de Seguridad Minera, año 2020.

Figura 1-15 Parámetros de una onda en movimiento armónico.

Los parámetros de vibración son propiedades fundamentales para describir el carácter del movimiento del suelo. Los parámetros corresponden al desplazamiento de una partícula en terreno, la velocidad con que se mueve al dejar el punto de reposo y la aceleración, siendo el rango en el cual cambia la velocidad de la partícula cambia.

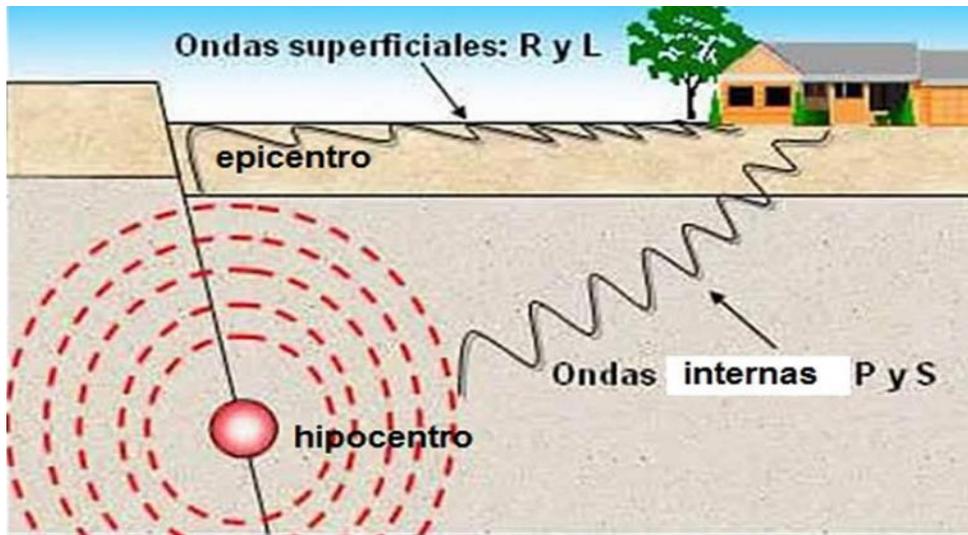
Los tipos de onda que se pueden observar son ondas internas y superficiales;

Ondas internas:

- Onda de compresión (P): Es la más rápida y de mayor amplitud, viaja a través del suelo y las partículas se mueven en la misma dirección, no deforma el material, puede desplazarse en sólidos, líquidos o gases.
- Onda transversal (S): Ondas transversales, se mueve 50 a 60% de la velocidad de la onda P, se mueve perpendicular a la dirección que se propaga la onda, produce cambios de forma en materiales y pueden desplazarse sólo en sólidos.

Ondas superficiales:

- Onda Rayleigh (R): Es una onda de superficie que se desvanece rápidamente con la profundidad, se propaga más lento, las partículas se mueven en un plano elíptico dentro de la onda y en plano vertical a la superficie, mismo sentido de la onda.
- Onda Love (L): Es una onda de superficie a partir de su epicentro, con movimientos de lado a lado. La descripción específica del movimiento es de cizalle y el plano de vibración es normal al plano del rayo son las que más hacen daño.



Fuente27: <https://afly.co/fdv3>

Figura 1-16 Tipo de ondas terrestres a partir de un sismo.

1.3.8 Cálculo cantidad de explosivo

El explosivo utilizado en esta minera es ANFO, granulado de grado explosivo de mediana densidad y alta absorción de petróleo, venta de unidad por saco de 25kg.

Al ser una minera ornamental, la cantidad de perforaciones es mucho menor en comparación de una minera a cielo abierto metálica. Una minera normal de rajo tiene comúnmente mallas de tipo 8x8 (16 perforaciones), y mayormente son mayores a 5 metros de profundidad, dependiendo si es gran minería puede llegar a superar las 9 pulgadas de diámetro por perforación y 15 m de profundidad.

En la mina Quintay se utilizan perforaciones de 1m de profundidad y 2 pulgadas de diámetro y tacos de 0,40 metros aproximadamente, se realizan sesiones de tronadura de 5 a 10 perforaciones, con espaciamiento y burden de 0,50 metros entre sí.

El ANFO utilizado tiene las siguientes características;

- Densidad: 0,78 g/cc
- Velocidad de detonación: 3000 m/s
- Presión de detonación: 30Kbar
- Energía: 3471 KJ/Kg
- Volumen de gases: 1056 L/Kg
- Potencia relativa: 0,98
- Resistencia al agua: Nula

Cálculo para carga de explosivo.

$$\begin{aligned} \text{Densidad} * (\text{De})^2 * 0,507 \text{ Kg/m} & \Rightarrow 0,78 * (2)^2 * 0,507 = 1,58184 \text{ Kg/m} \\ \text{Kg/m} * \text{columna de explosivo} & 1,58184 * (1\text{m} - 0,40\text{m}) = 0,949104 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

Por fórmula, en cada perforación realizada se debe agregar 0,950 kg /m, número el cual se multiplica por la cantidad de tiros para la malla de disparos. Donde “De” es el diámetro de perforación utilizado.

Los metros cúbicos tronados se sacan por fórmula y tabla.

Cálculo de material removido por 1metro de perforación

$$M^3/\text{perforación} = B * S * H$$

Donde;

B: es el burden o espaciamiento perpendicular entre el tiro y la pared del talud.

S: es el espaciamiento horizontal entre tiros con respecto a la pared del talud.

$$M^3/\text{perforación} = 0,50\text{m} * 0,50\text{m} * 1\text{m} = 0,25 \text{ m}^3$$

Por tabla del manual de operador de explosivos Enaex, por cada carga de 1m de profundidad y 2 pulgadas de diámetro de perforación, agregando los 0,950 Kg de explosivo ANFO, se tronará 0,25m³.

Como un ejemplo de tronadura realizado con 4 perforaciones, con las mismas cantidades de explosivo, mismo diámetro de perforación y mismas cantidades en la carga del taco.

Se trona 1m³, lo que dependiendo de las cantidades de explosivos y la variación del tamaño del taco, puede producir vibraciones excesivas y dañar el macizo rocoso aledaño, o causar una expulsión de energía en vertical, arrojando de esta manera material particulado en todas direcciones, por lo que se requiere una distancia de seguridad.

Una vez realizada la tronadura se debe esperar 30 minutos reglamentarios y revisar si después hay tiros quedados o ahogados. (Se agrega el manual operador de explosivos en bibliografía).

CAPÍTULO 2 TIPOS DE FORTIFICACIÓN:
SISTEMAS SU CALIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES.

2.1 DEFINICIÓN DE FORTIFICACIÓN.

Consiste básicamente en reforzar el entorno de una labor minera mediante algún sistema o elemento de sustento, ya sea; marcos, pernos, mallas, shotcrete o alguna combinación entre estos.

Si bien en minería la fortificación es una tarea que constituye una gran contribución a la seguridad dentro de un lugar de trabajo, por esto mismo los encargados de dicha tarea, deben tener una gran capacidad y responsabilidad para asegurar que su trabajo este siempre hecho de la mejor manera posible, teniendo como objetivos básicos;

- ❖ Proteger la vida.
- ❖ Reforzar el macizo rocoso, para que pueda sostenerse.
- ❖ Aminorar la fractura de roca progresiva.
- ❖ Evitar deformaciones en la geometría del macizo rocoso.
- ❖ Evitar derrumbes.
- ❖ Proteger integridad de equipos y herramientas.

En una fortificación, un sistema de soporte incluye una combinación de elementos, en el cual cada uno de estos elementos aporta con una o varias funciones, a la vez en lo que a soporte se refiere. Algunos de los elementos que se utilizan en conjunto disipan la energía de deformación, mientras que otros actúan en serie por transferencia de cargas entre elementos, ejemplo de malla a perno o de shotcrete a pernos.

Al crear una buena combinación de elementos del sistema de soporte, se determinará si el sistema resistirá de buena manera las presiones externas implementando 3 fundamentos, reforzar, sostener y contener, teniendo como objetivo proteger integridad física.

2.2 LUGARES DE APLICACIÓN PARA FORTIFICACIÓN.

En la minería un riesgo importante es la caída de rocas desde los taludes, cajas o techo dependiendo si es minería subterránea o rajo abierto, es por esto que ese riesgo se contrarresta con una fortificación, pudiendo de esta manera mejorar la seguridad en la faena.

Los sistemas de fortificación se pueden realizar de múltiples maneras y con variados elementos, de igual manera todas con el mismo propósito de mejorar la seguridad del lugar.

Se puede aplicar fortificación en;

- Galerías.
- Chimeneas.
- Caminos.
- Taludes de mina rajo abierto.
- Sector de acopio mineral o ganga.

2.3 DISEÑO Y RECONOCIMIENTO DE LUGARES PELIGROSOS.

Al implementar algún diseño de un sistema de fortificación se deben evaluar algunos puntos;

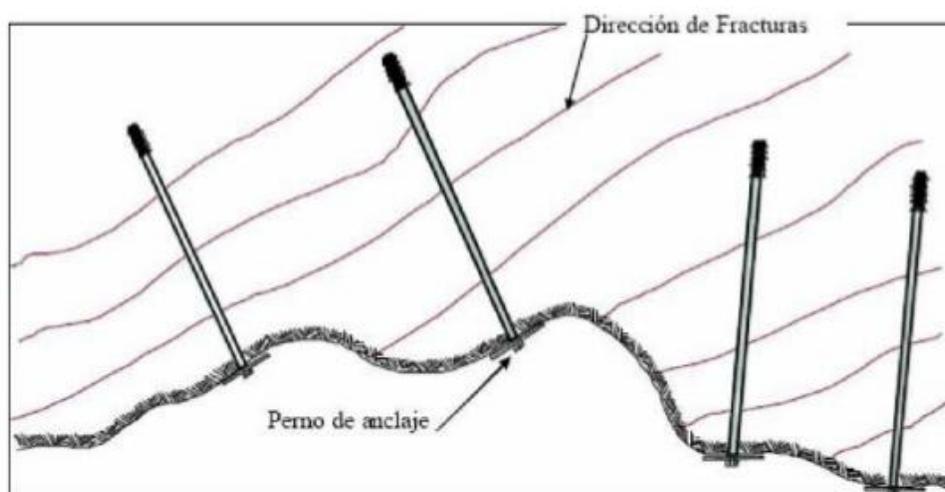
- Vida útil del talud o pared para fortificar.
- Humedad del lugar.
- Drenaje ácido de la roca presente.
- Sección de la labor o talud a fortificar.
- Fallas presentes.
- Longitud de perno.

Como último punto la dureza y grado de fractura de la calidad geomecánica del macizo rocoso, para eso las clasificaciones geomecánicas presentadas.

Esto debe ser evaluado detalladamente además de la estabilidad de la mina, para crear la menor perturbación posible con la fortificación y poder aprovechar la capacidad de auto soporte del macizo rocoso. Idealmente es fortificar lo menos posible, pero de manera efectiva.

La inclinación de los pernos es muy importante para su efectividad, se debe asegurar que los pernos sean colocados perpendicularmente a las fracturas y a la cara de la roca.

En conclusión, la fortificación se debe diseñar de manera específica para cada lugar.



Fuente 28: Sernageomin, año 2018.

Figura 2-17 Inclinación correcta de pernos de anclaje.

El reconocimiento y tratamiento oportuno del terreno peligroso o de una fortificación en mal estado, es vital para evitar que se produzcan accidentes, pérdidas humanas y daños materiales.

Existen diferentes indicadores que muestran un aumento de presión y posible desprendimiento de material, es por ello que se debe revisar en forma constante los siguientes aspectos;

- Aparición repentina de rocas nuevas en el piso.
- Pernos de anclaje antiguos cortados.
- Pernos de anclaje antiguos doblados.
- Malla de fortificación antigua pandeada debido a gran cantidad de roca desprendida sobre ella.
- Aparición de nuevas fisuras o señales de movimientos recientes del macizo.

2.4 TIPOS DE FORTIFICACIÓN.

Si bien un sistema de fortificación se conforma de un conjunto de elementos, estos se pueden clasificar según la calidad, funcionalidad o duración requerida.

- ❖ Pernos.
- ❖ Cables.
- ❖ Malla.
- ❖ Planchuela.
- ❖ Shotcrete.
- ❖ Marcos de madera o metálicos.

Estos elementos se pueden usar en diferentes combinaciones dependiendo de la duración del elemento y la vida útil del sistema, ejemplo de una combinación de muchas fallas y posibilidades de desprendimientos son las perforaciones con pernos mallas y planchuelas con roscas, además de un revestimiento de shotcrete, otras solo necesitan pernos y otras fallas marcos.

2.4.1 Fortificación

Una fortificación temporal o de desarrollo es de corta duración, en donde tendrá una duración estimada de no más de un año, y se caracteriza por ser instalada inmediatamente después de la tronadura, proporciona una seguridad inmediata al operario y evita el deterioro del macizo rocoso, ejemplo; perno con anclaje, perno rosca y mallas.

Una fortificación definitiva es instalada para asegurar la estabilidad de una labor, esta es instalada de forma posterior a los disparos de avance, teniendo una duración de vida útil hasta el término del proyecto. También se pueden clasificar bajo dos aspectos, fortificación activa y pasiva.

La fortificación activa es aquella que incluye los elementos o sistemas de soporte que ejercen alguna acción importante desde el instante en el cual son instalados, estos ejercen

una carga externa sobre el macizo. Ejemplo; pernos con anclajes expansivos, pernos tensados, cables de acero tensados, Split set.

Mientras que la fortificación pasiva corresponde a aquellos elementos de soporte que no aplican ninguna carga o fuerza externa sobre el macizo, al momento de la instalación. Solo se trabaja cuando el macizo rocoso experimenta algún tipo de deformación.

2.5 FORTIFICACIÓN POR PERNOS.

Analizando algunos de los pernos más utilizados en minería es posible ver el uso de variados tipos de pernos de anclaje. La mayoría de ellos tiene muy poca diferencia, teniendo un diseño muy común. Aunque es posible clasificarlos de acuerdo a su sistema de anclaje y sujeción, que puede ser anclaje puntual o sistemático a lo largo de toda la barra del perno.

Los pernos deben ser instalados perpendicularmente a las presentes grietas, para que puedan pasar por las fracturas a la roca madre y poder quedar firmes. La cantidad de pernos depende netamente del tamaño de la roca para asegurar que la roca no tienda a desprenderse.

El espaciamiento entre pernos debe tener como un mínimo 1 a 1.20 metros de distancia.

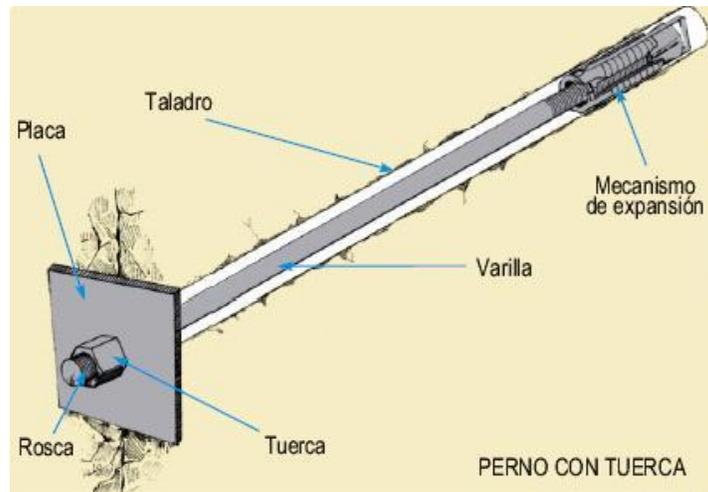
2.5.1 Anclaje mecánico.

Uno de los pernos más utilizados en esta categoría, es el perno de anclaje con cabeza de expansión, utilizado en labores mineras.

Consta con una cantidad de partes; cabeza o mecanismo de expansión, el perno de anclaje, una plancha metálica y la tuerca del perno.

Este método consiste en una barra de acero usualmente de 16 mm de diámetro con un dispositivo de expansión en su extremo final, que al ser introducido en la perforación se abre mediante el giro de la rosca, lo cual le permite quedar sujeto por acción de roce.

Este tipo de perno es para uso temporal y debiera no instalarse ante rocas de procedencia muy resistente o dura que tenga presencia de agua, ya que el mecanismo de expansión fallara al resbalar o no pueda penetrar en las paredes de la perforación.



Fuente 29: Revista seguridad Minera, año 2018.

Figura 2-18 Perno con tuerca anclado mecánicamente.

2.5.2 Anclaje cemento resina.

Los pernos de anclaje cemento resina son de los más utilizados en minería subterránea, usado por más de 50 años en el ámbito minero. Este consta de una barra de acero corrugado, que es introducido en la perforación y utilizando lechada de cemento o resina como método de fijación para dejarlo firme.

La eficacia del perno depende si este tiene buena adherencia entre perno y roca, además de la adhesión proporcionada por el cemento o resina, que finalmente también protege al perno de la oxidación.

Para rocas de mala calidad esta es una de las mejores opciones, pero no recomendable para utilizarlo en medio de presencia de discontinuidades abiertas, a no ser que la cementación sea controlada. La sujeción depende de las irregularidades presentes en la perforación y fricción creada entre el pegamento y el fierro.

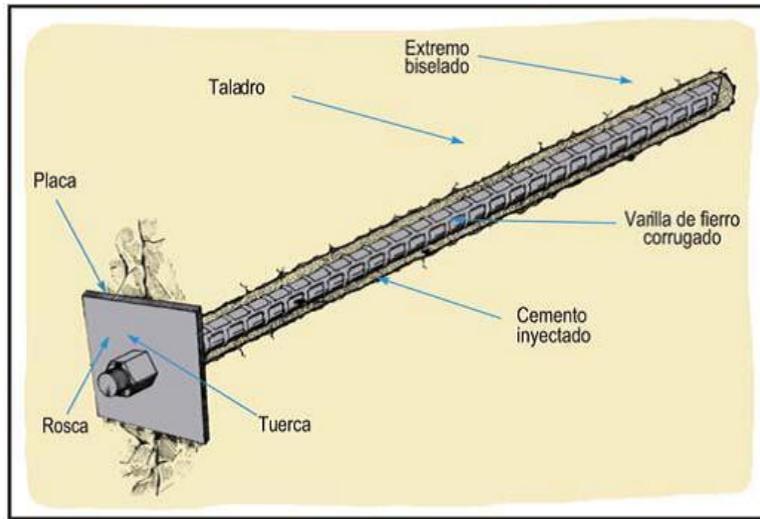
2.5.3 Lechada cemento/perno resina.

Para lo que es el caso de perno con lechada de cemento, se requieren varios días de curado. Con una correcta instalación son bastante competentes y de buena duración con resistencia a rocas con alta dureza. Aunque no es recomendado usar en presencia de agua.

Para los pernos con resina es necesario usar un catalizador, estos dos se deben introducir forma de cartucho dentro de la perforación ya perforada. Se pueden encontrar dos tipos de resina, las de fraguado rápido que secan en 30 segundos, son puestas al fondo de la perforación para la sujeción del perno, y la resina de fraguado lento que seca en un tiempo aproximado de 3 a 6 minutos.

Recomendable utilizar este método, ya que puede ser sometido a altas tensiones desde el principio de la instalación y soporta la presencia de aguas acidas.

En ambos casos se emplean aditivos para mejorar las propiedades adhesivas, los aceleradores utilizados pueden ser de fraguado, anti-floculantes y reductores de tensión superficial.



Fuente 30: Revista seguridad Minera, año 2018.

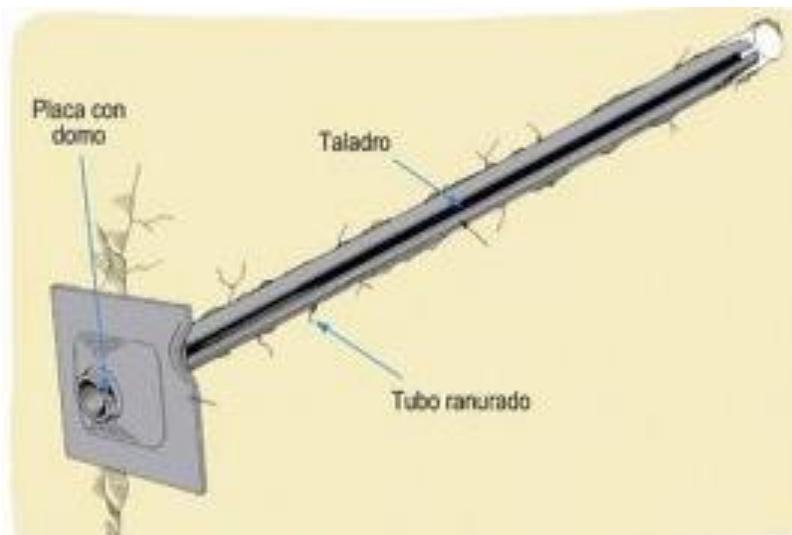
Figura 2-19 Perno con resina o lechada.

2.5.4 Tipos de pernos.

2.5.4.1 Split set.

Este perno es un tubo de acero compresible más ancho que el diámetro de perforación y a lo largo de su misma longitud está dividido en su parte central.

Al momento de ser introducido debe ser con presión y el perno disminuirá su diámetro, al ser introducido se expande y crea fricción la cual lo mantiene sujeto a las paredes de la perforación a lo largo de todo el largo del perno. Esta misma fricción creada previene el movimiento o separación del terreno circundante al perno. Este perno es utilizado en una roca muy fracturada o agrietada combinada con condiciones de baja tensión.



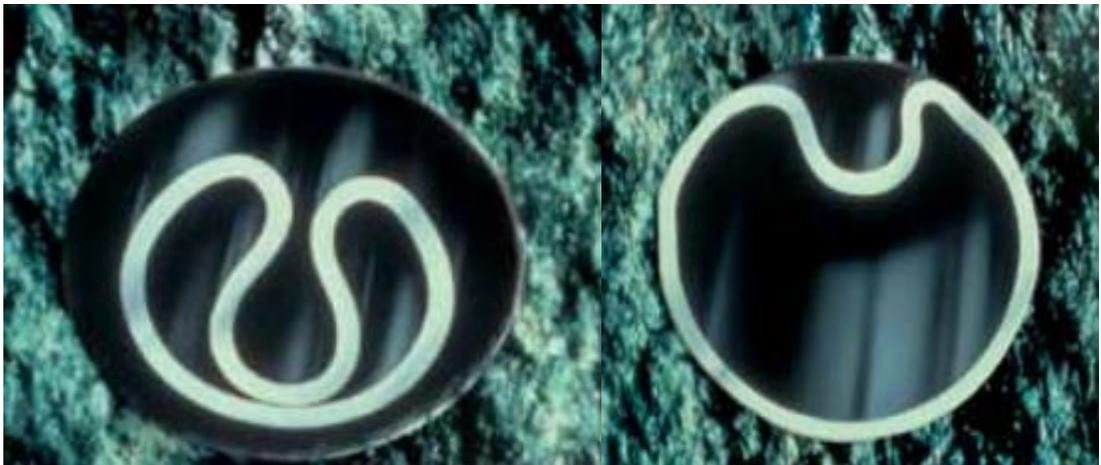
Fuente 31: Revista seguridad Minera, año 2018.

Figura 2-20 Perno Split sets.

2.5.4.2 Swellex

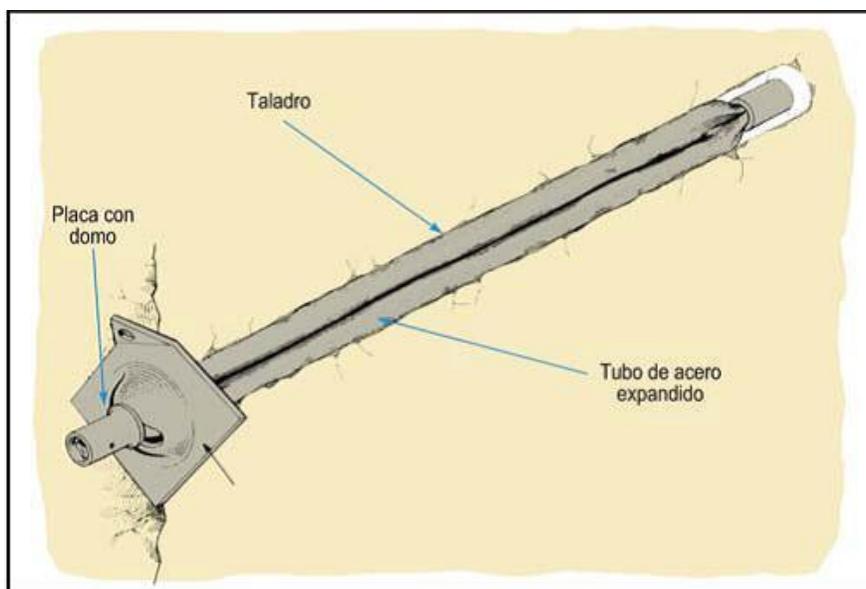
Este perno consiste en un acero de un alto límite elástico, hermético y plegado sobre sí mismo. Tiene una fácil inserción a la perforación ya que al estar plegado su diámetro es menor que el barrenado, su activación es mediante una inyección de agua por bombas de alta presión. En el extremo final sellado y equipado con una boquilla para la inyección de presión.

Al ser inflado dentro de la perforación rápidamente genera una fricción y se adapta las irregularidades de las paredes de la perforación, de esta manera se consigue el anclaje deseado. Este perno suele ser utilizado en rocas duras o blandas y en terrenos fracturados. Ver Figura 2-21 y 2-22.



Fuente 32: Revista seguridad Minera, año 2018.

Figura 2-21 Perno swellex plegado y con inyección de presión.



Fuente 33: Revista Seguridad Minera, año 2018.

Figura 2-22 Perno Swellex, vista general.

2.5.4.3 Perno helicoidal

Perno helicoidal o barra helicoidal, dependiendo del diámetro de este se puede utilizar como fortificación temporal o definitiva. Diseñado para reforzar y preservar resistencia natural de los estratos rocosos, suelos o taludes. El diámetro varía desde los 16 mm hasta aprox. 25 mm. Este perno es uno de los más utilizados para fortificar debido a la rigidez y firmeza que se obtiene ya sean rocas duras o roca fracturada. Siempre y cuando se utilice con el aditivo correcto, funcionara como complemento.

Puede ser introducido a presión con equipo de perforación, lo que dependerá de que tipo de sello se le aplicará, en estos casos pueden ser resinas o cemento.

Este perno tiene la característica de tener un hilo izquierdo de gran paso por toda su extensión, se usa con su respectivo sistema de fijación, planchuela y tuerca. El largo de este perno va desde 1 m hasta los 12 m aproximadamente. Ver Figura 2-23 sistema completo.



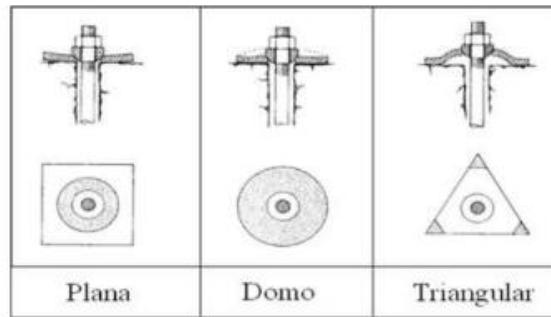
Fuente 34: Catálogo DSI

Figura 2-23 Perno helicoidal o barra helicoidal con planchuela y tuerca.

2.5.5 Acompañamiento

2.5.5.1 Planchuelas.

Este elemento es complementario a los pernos y están diseñados para cumplir funciones específicas como; crear un confinamiento de la superficie fracturada con un soporte entre pernos manteniendo la integridad, sostener la malla de fortificación y también permitir una distribución de carga en la cabeza del perno de una manera uniforme. Ver Figura 2-24.



Fuente 35: Revista de seguridad Minera, año 2018.

Figura 2-24 Tipos de planchuela.

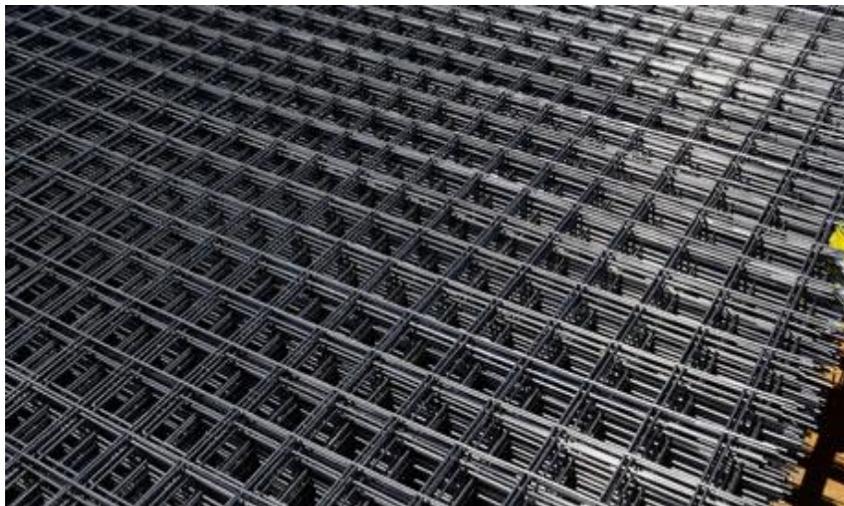
2.5.6 Mallas de fortificación.

Las mallas para fortificar en minería, están fabricadas de un alambre anticorrosivo, con una aleación de 4 veces superior al galvanizado normal. Además de ser un acero de alta resistencia, viene en distintos grosores. Existen dos tipos de mallas más utilizadas en minería.

2.5.6.1 Electro soldada.

Es caracterizada por las uniones soldadas eléctricamente, solo por fusión y sin aporte de material, lo cual permite tener uniones sólidas y con terminaciones de calidad. Esta malla está formada de alambres o barras cruzadas entre sí, formando cuadrados.

Tiene una gran ventaja en cuanto a la rigidez, que al ser superior crea un confinamiento en las zonas entre pernos, además de permitir una posterior instalación de shotcrete.



Fuente 36: Catálogo Industria Minera.

Figura 2-25 Malla electrosoldada.

2.5.6.2 Tejida o trenzada.

Esta malla está caracterizada por estar tejida o trenzada entre sí, el alambre es mucho más flexible que otros tipos de mallas, por lo cual necesita un patrón de pernos con espaciamiento de 1,2 y 2 metros de distancia para que no se despegue del macizo rocoso.

Su principal característica es su capacidad de soportar terrenos muy fracturados en bloque más pequeños, además de su ductilidad, lo cual la hace de fácil manipulación al instalar. Recomendada si se desea utilizar shotcrete.



Fuente 37: Catálogo Industria Minera.

Figura 2-26 Malla trenzada.

2.5.7 Ventajas y desventajas

Tabla 2-13 Perno lechada cemento / resina

Tipo de perno	Ventajas	Desventajas
Perno con lechada de cemento	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene alta duración en buenas condiciones. • Competente para uso de mediano plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere tiempo prolongado para su máxima capacidad de resistencia. • Con flujo de agua no es efectiva. • Necesita control estricto de la calidad de lechada. • Necesita aditivos.
Perno con resina	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte inmediato después de instalación. • Capacidad de tensar el perno. • Buen soporte en macizos competentes. • Buena protección frente a corrosión y vibraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vida limitada de la resina. • Costo más elevado comparado con lechada de cemento. • La calidad de resina se puede ver afectada por el ambiente de la mina. • Necesita aditivos.

Fuente 38: Elaboración propia

Tabla 2-14 Perno Split sets / Perno Swellex

Tipo de perno	Ventajas	Desventajas
Perno Split Sets	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación simple. • Soporte inmediato. • Fácil instalación de malla. • Efectivo para control de fallas y cuñas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte temporal. • Sufre corrosión. • Presenta baja resistencia al corte. • No se puede tensar. • El diámetro es crucial para el funcionamiento.
Perno Swellex	<ul style="list-style-type: none"> • Se acomoda a los movimientos del terreno. • No requiere maquinaria pesada para la instalación. • Refuerzo inmediato. • Mejor opción para terreno fracturado. 	<ul style="list-style-type: none"> • No sirve en zonas cercanas a voladuras. • Sufre corrosión. • Frente a variación de diámetro pierde eficiencia.

Fuente39: Elaboración propia

Tabla 2-15 Mallas de fortificación

Malla	Tensión	Material extra	Mayor galvanizado	Confinamiento de pernos	Shotcrete	Fácil instalación	Espaciamiento de pernos
Electro soldada	SI APLICA	NO APLICA	SI APLICA	SI APLICA	SI APLICA	NO APLICA	NO APLICA
Trenzada o tejida	NO APLICA	NO APLICA	SI APLICA	SI APLICA	SI APLICA	SI APLICA	SI APLICA

Fuente40: Elaboración propia.

2.6 RESISTENCIA MATERIAL DE SISTEMAS DE FORTIFICACIÓN.

Uno de los riesgos más importantes en labores mineras es la caída de material, en minería subterránea es el desprendimiento de roca desde el techo o de sus cajas, mientras que en las minas de rajo abierto es el desprendimiento de material puntual o deslizamiento de terreno. Al construir labores, se extrae un determinado volumen de masa rocosa que provoca cambios en las condiciones naturales de equilibrio de esfuerzos.

El sostenimiento es el conjunto de procedimientos que permiten mantener estable labores que no son auto soportable, son dos los grupos principales de los métodos de sostenimiento,

activo y pasivo, en el método pasivo se encuentran los arcos de madera y metálicos, sostenedores y otros que no se introducen al macizo rocoso, en cambio los métodos de fortificación activos, se realiza una penetración en la roca para la implementación de sujeción de pernos.

Existen diversos tipos de pernos, mallas, planchuelas, resinas y cemento lechada para la sujeción de fortificación, de los cuales describiremos a continuación por tipo:

2.6.1 Pernos

Barra helicoidal, presenta gran capacidad de transferencia de carga en macizos rocosos, competencia y durabilidad. Se trabaja en la perforación con inyección de lechada o instalación de cartuchos de resina que en conjunto tienen alta resistencia a compresión y tracción. Medidas de entre 1000 mm hasta los 12000 mm, con diámetros de 22 y 25 mm.

Tabla 2-16 Barra helicoidal

Barra helicoidal diámetro 22				
	Ton	KN	Ton	KN
Limite de fluencia(min)	15	147	10	98
Limite de ruptura (min)	23	225	16	154
Calidad acero	A 630-420H		A 440-280H	
Barra helicoidal diámetro 25				
	Ton	KN		
Limite de fluencia(min)	19	190		
Limite de ruptura (min)	29	283		
Calidad acero	A 630-420H			

Fuente 41: Catálogo IMEL Mining Rock

Split set, también llamado sistema Frirock, es un sistema estabilizador que actúa por fricción, es un anclaje seguro y se desplaza con la roca. Medidas estándar.

FR40:300 mm hasta 3000 mm

FR47:600 mm hasta 3500 mm

Tabla 2-17 Resistencia perno Split sets

Descripción	FR40	FR47
Diámetro exterior tubo (mm)	40	47
Espesor mínimo tubo (mm)	2.3	2.8

Diámetro anillo (mm)	7.5	7.5
Calidad acero	ASTM-1011	ASTM A-36
Límite de fluencia (MPa)	410	270
Límite de ruptura (Mpa)	520	420
Límite de ruptura mínima tubo (Ton)	10	15
Peso tubo (Kg/m)	1.85	2.85

Fuente 42: Catálogo IMEL Mining Rock

Auto perforante, este perno consiste en una barra roscada en sentido izquierdo en toda su longitud, estas barras constan de una perforación central la cual sirve para el paso de aire agua del barrido de perforación. Este perno está diseñado para ser utilizado en terrenos poco cohesivos o consolidados como arenas o rellenos.

Tabla 2-18 Perno auto-perforante características

	exterior	interior	exterior efectiva	Sección	Carga de rotura	Carga limite	Resistencia tracción	Limite elástico	Peso	Tipo hilo
	mm	mm	Mm	Mm2	Kn	Kn	N/mm2	N/mm2	Kg/m	
R25N	25	14	23	244	210	150	805	660	2.3	ISO 10208
R32N	32	18.5	29.1	396	280	230	720	560	3.0	
R32S	32	15	29.1	488	360	280	740	570	3.5	
R38N	38	19	35.7	717	500	400	700	540	4.8	
R51L	51	36	47.8	776	550	450	690	580	5.6	
R51N	51	33	47.8	939	800	630	840	670	7.6	ISO 1720
R76N	76	51	76	1835	1600	1200	880	660	16.5	
T76S	76	45	76	2400	1900	1500	790	630	19.0	
Longitudes 1m – 1.5m – 2m – 2.5m – 3m – 3.5m – 4m – 4.5m – 5m – 5.5m - 6m										

Fuente 43: Catálogo IMEL Mining Rock

Perno cable liso, es fabricado en alambres de alto carbono, para la estabilización de grandes masas de rocas y taludes. El cable está formado de 6 alambres enrollados de un séptimo denominado alma, a este conjunto se le define perno cable con un diámetro nomina de 15.24mm.

Tablas 2-19 Perno cable características

Perno cable liso	
Resistencia a la fluencia mínimo	23.9 ton
Resistencia a la ruptura mínimo	26.5ton
Alargamiento mínimo	3.5%
Calidad del acero	ASTM A416-270
Diámetro del cable	15.24mm
Peso lineal	1.10 Kg/m

Fuente 44: Catálogo IMEL Mining Rock

Swellex, este perno es uno de los de más fácil instalación, esta sellado en un extremo y al otro equipado con una boquilla especial para la debida inflación mediante bomba, crea un roce y un ancla, lo que entrega soporte a toda la columna en toda la longitud del tipo. Necesita una presión de 30MPa para expandirse, inducida por bomba de agua. Insensible a las vibraciones y no requiere elementos de adherencia.

Tabla 2-20 Perno swellex características

Perno swellex	
Tipo	12
Carga mínima de rotura	>120 Kn
Elongación mínima	25 %
Diámetro requerido del taladro	32-39 mm
Diámetro optimo del taladro	35-38 mm
Diámetro original del tubo	41x2 mm
Dimensión del casquillo de instalación	30/36 mm
Dimensión del casquillo superior	28 mm
Largos de suministro	1-8 m

Fuente 45: Catálogo IMEL Mining Rock

2.6.2 Mallas

Electro soldada, esta malla es electro soldada sin aporte de material, lo que permite uniones sólidas y terminaciones de alta calidad. Está hecha de acero AT56-50H que permite reducir las secciones debido a su alta resistencia. Ver Tabla 2-21 para características de mallas electrosoldadas.

Tabla 2-21 Malla electro soldada características

Tipos	Distancia barras		Diámetro barras		Sección de acero		Peso malla	
	Longit. mm	Transv. mm	Longit. mm	Transv. mm	Longit. Cm2/m	Transv. Cm2/m	Kg/m2	kg
C -139	100	100	4.20	4.20	1.39	1.39	2.18	28.34
C -188	150	150	6.00	6.00	1.88	1.88	3.00	39.03
C -196	100	100	5.00	5.00	1.96	1.96	3.08	40.04
C -257	150	150	7.00	7.00	2.57	2.57	4.08	53.10

Fuente 46: Catálogo IMEL Mining Rock

Tejida galvanizada, esta malla es para refuerzo de roca con un largo normal 25 m, ancho de 2 m y una cuadrícula de 5 a 10 cm. Fabricada con alambre galvanizado según norma NCH227, la resistencia del alambre es menor o igual a 50kg/mm².

Tabla 2-22 Malla tejida características

Tipos	Dimensión(m)	Alambre	Peso m2	Diámetro en mm	Total kg	Rollos por metro ²	Abertura mm
5008	2x25	BGW 8	4.80	4.19	240	50	50
5010	2x25	BGW 10	3.10	3.40	155	50	50
10006	2x25	BGW 6	3.36	5.16	168	50	100
10006	2x25	BGW 6	3.36	5.16	210	62.5	100

Fuente 47: Catálogo IMEL Mining Rock

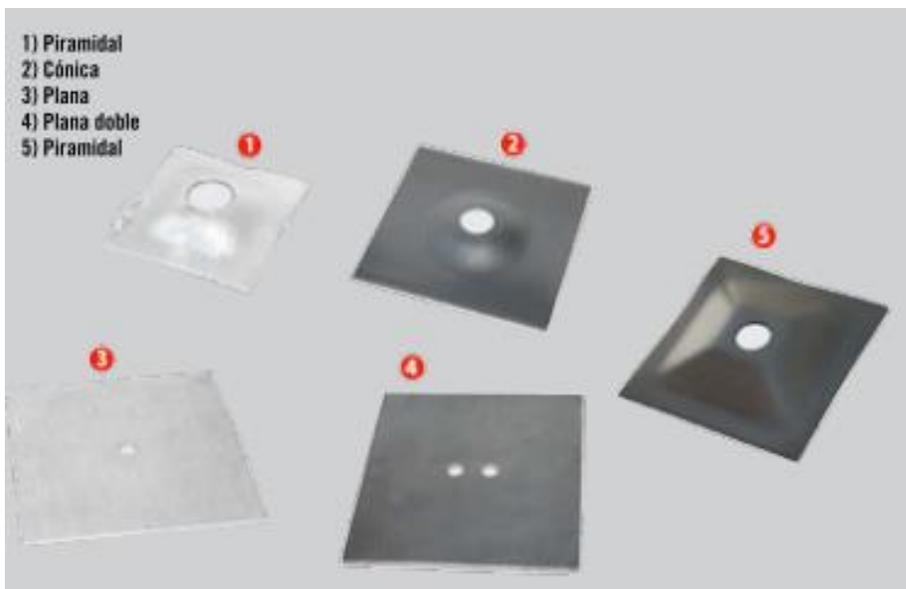
2.6.3 Planchuelas

Están diseñadas para distribuir la carga en la cabeza del perno de anclaje de manera uniforme en la roca adyacente. Fabricada en acero ASTM A-36 y ASTM A1018, grado 60 clase 1, se fabrican en acero negro y galvanizado

Tabla 2-23 Planchuela características

Tipos	Largo mm	Ancho mm	Espesor mm	Peso kg	Uso perno
Estampada domo piramidal	150	150	4	0.72	Frirock
Estampada domo piramidal	150	150	4.5	0.81	Frirock
Estampada domo piramidal	200	200	4.5	1.44	Frirock- Helicoidal
Estampada domo piramidal	200	200	5	1.60	Frirock- Helicoidal
Estampada domo cónico	200	200	4.5	1.44	Frirock- Helicoidal
Estampada domo cónico	200	200 </td <td>5</td> <td>1.60</td> <td>Frirock- Helicoidal</td>	5	1.60	Frirock- Helicoidal
Estampada domo cónico	200	200	6	1.92	Helicoidal
Estampada domo cónico	200	200	8	2.56	Helicoidal
Plana con una perforación	200	200	8	3.20	Auto perforante
Plana con una perforación	200	200	10	3.20	Auto perforante
Plana con una perforación	200	200	12	3.84	Auto perforante
Plana con una perforación	250	250	8	4.00	Auto perforante
Plana con una perforación	250	250	10	5.00	Auto perforante-cable
Plana con una perforación	250	250	12	6.00	Cable
Plana con dos perforaciones	250	250	12	6.00	Cable

Fuente 48: Catálogo IMEL Mining Rock



Fuente 49: Catálogo IMEL Mining Rock

Figura 2-27 Planchuela por catálogo Mining rock.

2.6.4 Resinas

Carbothix es una resina de silicato con espesamiento instantáneo, de rápida curación para sellar pernos, utilizado en pernos rosca de 25 mm, resistencia a la tracción de 40,4 ton. Mayor consumo económico debido a la cantidad que se requiere para rellenar el anillo de perforación.

Geoflex S, es una resina de fijación rápida utilizada mayormente con pernos auto perforante, se puede aplicar en grietas mayores a 0,15 mm, la resina alcanza el 90% de la resistencia final en 15 minutos, la resistencia es de 5 Mpa, no es espumante y tiene una línea elástica por lo que resiste el movimiento del macizo rocoso.

Las resinas se utilizan normalmente con perno de anclaje helicoidal o corrugado, las resinas son introducidas en las perforaciones luego se inserta el perno rotándolo. Esta operación permite que se mezclen los componentes dentro del cartucho y se rellena la perforación y fijando el perno.

Existen variados tipos de resina con diferentes tiempos de fraguado, en segundos como también un par de minutos, teniendo también diferentes códigos por tiempo para facilitar las características, ejemplo; código verde es secado rápido, código amarillo o blanco secado lento.



Fuente 50: Catálogo REMICSA

Figura 2-28 Barra de resina marca REMICSA.

Tabla 2-24 Características diámetros de perforación para resina

Diámetro del perno	Diámetro del cartucho de resina				
	23 mm	28 mm	32 mm	32 mm	32 mm
16 mm	X				
19 mm	X	X			
22 mm		X	X		
25 mm		X	X	X	
29 mm				X	X

32 mm					X
	25 mm	32 mm	35 mm	38 mm	41 mm
	Diámetro del taladro				

Fuente 51: Catálogo REMICSA

2.6.5 Cemento lechada

Es una mezcla de cemento agua, con una gran cantidad de agua para la consistencia viscosa líquida, utiliza aditivos para un secado más rápido lo que permite ser utilizado para rellenar cavidades, sellar pernos y junta de materiales como perno malla.

Uno aditivo utilizado es el CAVE GUNITEC 5-LE, que permite aceleración de fraguado, mejora la adherencia a pernos y barras, no presenta retracción una vez endurecida, certificada según norma NCh 148.

2.6.6 Accesorios y repuestos

Tuercas de acero, son el elemento complementario al perno de anclaje, fabricado con acero SAE 1045 y se utiliza con barras helicoidales de entre 16, 19, 22 y 25 mm. Teniendo una tensión mínima de fluencia de 600 Mpa y una tensión de rotura de 850 Mpa.

La cabeza de expansión, es un tipo de fijación mecánica de los pernos de anclaje, se utilizan para un avance rápido y dar seguridad en un sostenimiento de túneles, posterior es necesario realizar anclaje permanente con lechada o resina dependiendo de las propiedades geomecánicas.

Una cabeza de expansión tiene tensión de fluencia mínima de 220 Mpa y una tensión última de 340 Mpa. Accesorio cumple con la normativa ASTM-432 y NCH 204.

Los separadores son accesorios de plástico reforzado, usado en la aplicación de conjunto de cables de anclaje, fabricado para conjunto de 2 a 6 pernos cable.

Barril y cuña, son utilizados para consolidar la planchuela a un cable de diámetro 15,24 mm.



Fuente 52: Catálogo IMEL Mining Rock

Figura 2-29 Tuerca acero - cabeza de expansión - separadores - barril y cuña.

Entre elementos de fortificación existe bastante variedad en cuanto a pernos, acoples, dimensionamiento de estos mismos, distintos tipos de funciones y acoplamientos, variedades de resinas y tiempos de fraguado, shotcrete, clasificación de mallas por tipo de abertura y grosor, el material del cual están constituidas. Basándose en normativas de aceros ASTM, A36, NCh204, 523, A630, A709, etc. Normas regulables para la construcción, o perfiles estructurales, barras de acero que cumplan con estándares para producción industrial.

Se menciona algunos tipos de elementos para fortificación;

Perno: Helicoidal, Split Set, Swellex, Fastanchor, Perno cable, perno fibra, auto perforante, entre otros.

Marcos: reticulados, vigas, liner plate, madera, son algunos.

Resina: mineral, encapsulada, sintética, strata bond, fibra

Malla: poliéster, electrosoldada, tejida.

Cada tipo de elemento con diferentes dimensiones, diferentes diámetros, diferente material, diferentes tiempos de secado, pero con la finalidad de fortificar estructuras en minería.

En este caso se utilizan los sistemas más comunes y de fácil acceso, para poder realizar cotización y posible implementación.

Cabe destacar que la maquinaria de perforación es una stoper manual neumática, la cual realiza perforaciones en vertical con una barra de 1m, el equipo tipo Jack-leg es utilizado para realizar perforaciones en horizontal habitualmente en galerías. Ver Figura 2-30.

Tabla 2-25 Descripción equipo de perforación.

Marca	Tipo	Impacto/minuto	Consumo aire	Peso
Toyo	stoper	2000	CFM 98	Martillo 28 kg
			M3/min 2.7	Barra 6 kg

Fuente 53: Elaboración propia



Fuente 54: Foto propia en terreno.

Figura 2-30 Operador barrenando para la instalación de explosivo.

2.7 PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS.

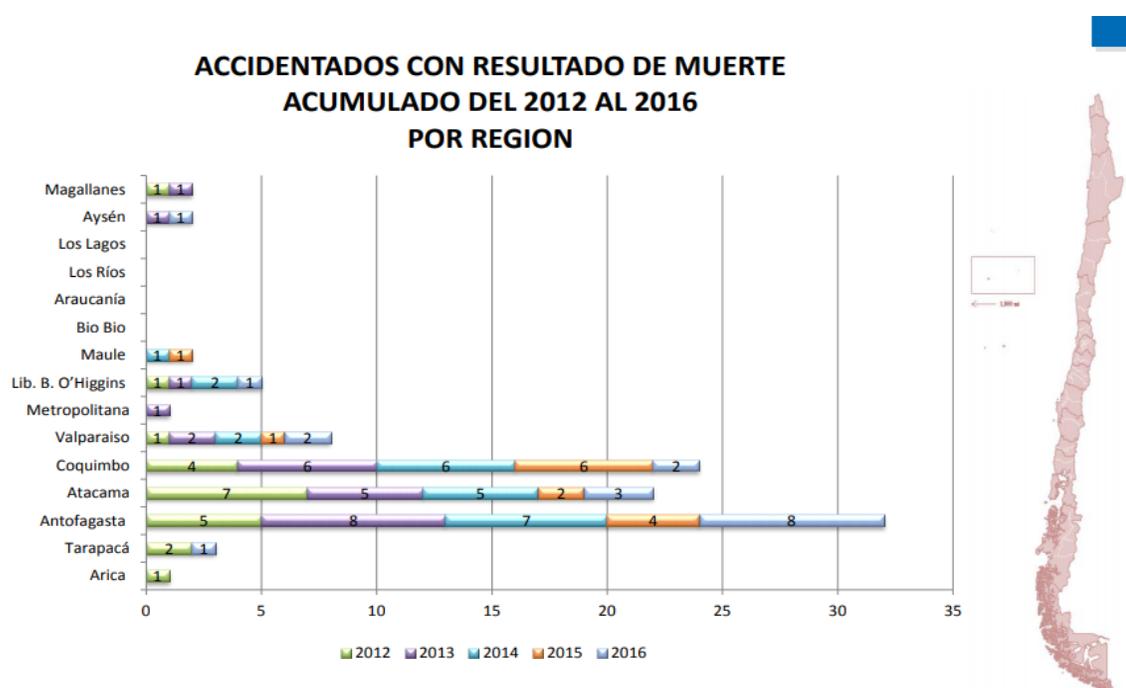
Según el reglamento de seguridad minera, titulado 4 en explotación de minas a rajo abierto, artículo 245.

Citado Textual, *“se deberá mantener un control permanente en los frentes de trabajo, respecto del desmoronamiento y desprendimiento de rocas susceptibles de generar accidentes, como asimismo de la estabilidad de las paredes y crestas de los bancos.”*

Haciendo referencia a la falta de control y necesidad de una fortificación debido a la cantidad de fallas y desprendimientos de la roca, a pesar de ser una minera ornamental (no metálica), y utilizar una razón de explosivo de menor cantidad que una minera de mediana o gran envergadura. Ver Gráficos Sernageomin.

2.7.1 Accidentabilidad minera según Sernageomin 2016.

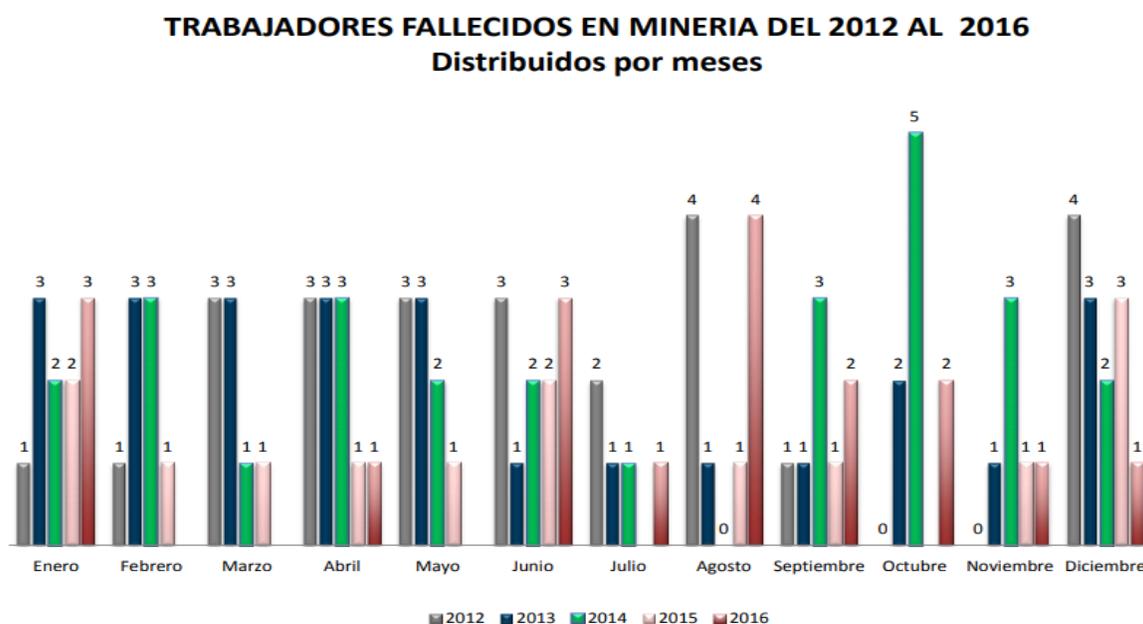
Gráfico 2-1 Accidentados por región.



Fuente 55: Informe Accidentabilidad Sernageomin

En la región de Valparaíso desde el 2012 al 2016 ha habido 8 accidentados con resultado de muerte.

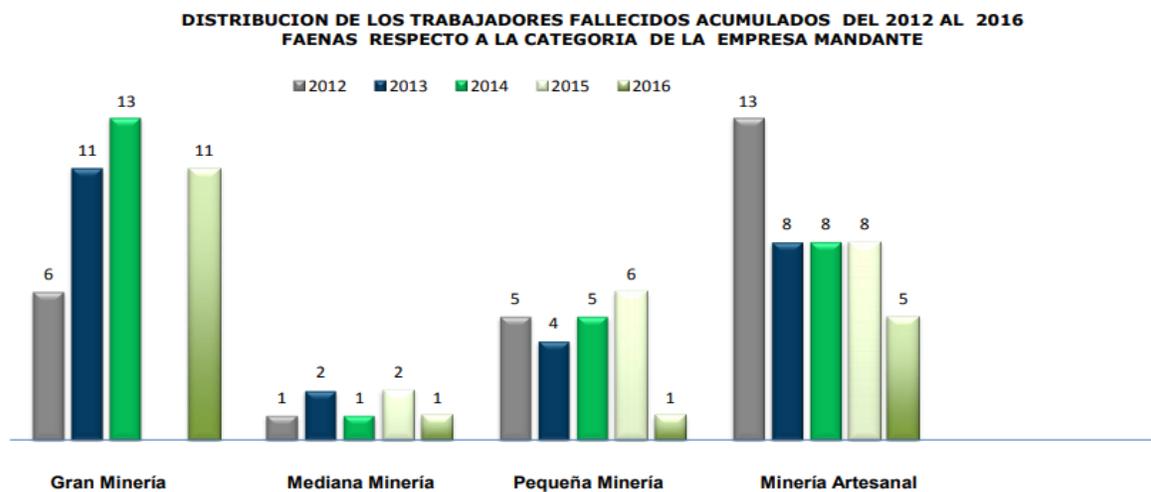
Gráfico 2-2 Trabajadores fallecidos distribuidos por meses.



Fuente 56: Informe Accidentabilidad Sernageomin

El conteo realizado por Sernageomin determina que solo en 2016 hay de 1 a 4 fallecidos al mes.

Gráfico 2-3 Distribución de fallecidos por categoría de faena.

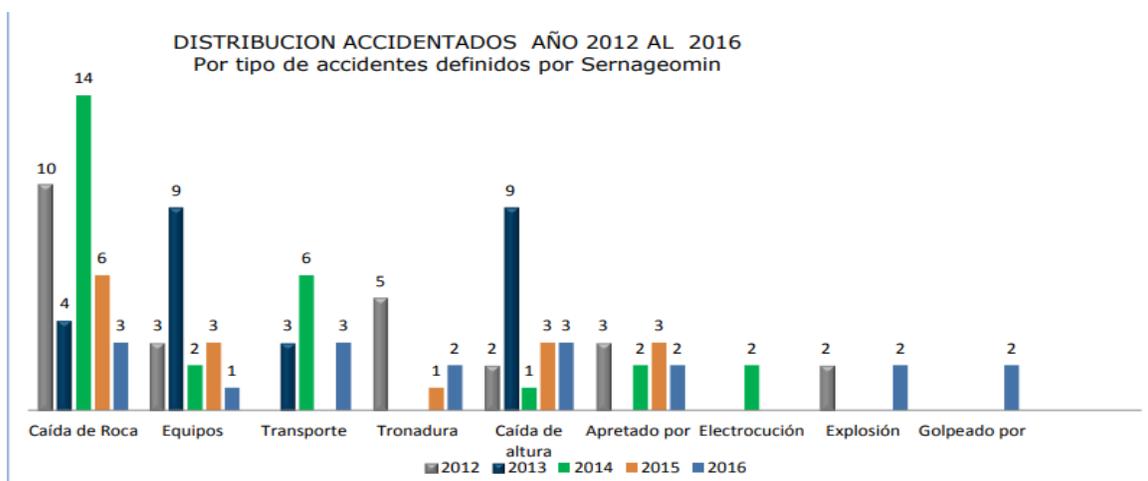


Categoría A (Gran Minería):	Igual o superior a 1.000.000 de Horas Hombre trabajadas en el periodo respectivo (corresponde al trabajo promedio de igual o mayor a 400 trabajadores durante 1 año).
Categoría B (Mediana Minería):	Igual o superior a 200.000 e inferior a 1.000.000 de Horas Hombre trabajadas en el periodo respectivo (corresponde al trabajo promedio de igual o mayor a 80 e inferior a 400 trabajadores durante 1 año).
Categoría C (Pequeña Minería):	Igual o superior a 30.000 e inferior a 200.000 de Horas Hombre trabajadas en el periodo respectivo (corresponde al trabajo promedio de igual o mayor a 12 e inferior a 80 trabajadores durante 1 año).
Categoría D (Minería Artesanal):	Igual o inferior a 30.000 de Horas Hombre trabajadas en el periodo respectivo (corresponde al trabajo promedio de igual o inferior a 12 trabajadores durante 1 año).

Fuente 57: Informe Accidentabilidad Sernageomin

El estudio realizado por Sernageomin demuestra que desde 2012 a 2016, entre minería artesanal y pequeña minería fallecen de 1 a 11 trabajadores.

Grafico 2-4 Tipo de accidente.



Fuente 58: Informe Accidentabilidad Sernageomin

Se distribuye por tipos de accidentes desde 2012 a 2016, en donde 37 trabajadores fallecen por caída de roca.

Gráfico 2-5 Accidente más recurrente

Accidentes fatales y graves en la minería chilena

El accidente más recurrente corresponde a <Golpeado por>, el cual tiene la siguiente distribución.

Cuadro 11. Fallecidos <golpeados por>, durante los años 2000 al 2016

Tipo de Accidentes	Fallecidos
Total Fallecidos	216
Golpeado por roca	161
Golpeados por bombo de pique barro, piedras y agua.	5
Golpeados por onda expansiva por explosión de gas metano.	2
Golpeado por tubo HDPE	2
Golpeado por onda explosiva (grisú). Presencia de gas grisú	2
Golpeado por inundación de agua, inmersión	2
Golpeado por explosión de gas grisú	2
Golpeado por deslizamiento de rocas, talud del banco. No advertir ni asegurar.	2
Golpeado por deslizamiento de rocas, del talud aterrándolos., No advertir ni asegurar	2

Fuente 59: Informe Accidentabilidad Sernageomin

Según Sernageomin 161 trabajadores son accidentados de golpe por roca.

En base a la cantidad de accidentes que se pueden encontrar en minería cielo abierto específicamente, pequeña minería y minería artesanal, es recomendable realizar un tipo de fortificación dependiendo de la calidad del macizo rocoso.

2.8 ANÁLISIS DE COSTOS DE MATERIALES

Para la cotización de los distintos elementos que se necesitan para hacer un sistema de fortificación se realizaron llamadas a diferentes empresas ubicadas en Chile y en EEUU. Obteniendo de esta forma precios referenciales al mercado minero. Se consultaron medidas comparativas en cuanto a perno, mallas y resinas. El valor utilizado esta en dólares, marcando como referencial el valor actual del dólar en el mercado (\$792,2).

La elección de perno es referencial entre Helicoidal, Split Set y Swellex.

Las mallas van en rollos de 2,5x25 m tejida y la electrosoldada de o 1,8x5 m la sección dependiendo de la empresa de distribución.

Las resinas varían en cuanto a la calidad, cantidad y rapidez de fraguado.

Estos valores son referenciales, mallas y resinas son comercializadas por unidad y en cuanto a pernos se refiere la compra es en paquetes de 100 pernos en la mayoría de las empresas consultadas.

Tabla 2-26 Consulta de materiales

	Pernos por unidad (2,9 m) Diámetro 22 – 25 mm			Mallas rollo o sección Ap.50/100 mm- esp.5/7 mm E-T/2.5x25 m		Resinas por unidad Cod.verde /rápido Amarillo /lento	
Empresa	Helicoidal	Split Set	Swellex	Electro soldada	Tejida	90s	4min
CAP	\$7	\$7	\$10	No aplica		No aplica	
IMEL	\$6	\$7	\$10	\$64	\$210	Agotado	\$4
DSI	\$7	\$6	\$10	\$65	\$208	\$8	\$4
TROMAX	\$7	\$7	\$11	\$65	\$209	No aplica	
EQUIP MENT	\$7	No aplica		Agotado		\$7	\$5
RECOMIN	\$6	\$7	\$11	\$65	\$209	\$7	\$5
RGM	\$7	No aplica		\$66	\$209	No aplica	

Fuente 60: Elaboración propia en base a consultas realizadas en respectivas empresas de distribución de materiales.

CAPITULO 3 EVALUACIÓN DE PROPUESTA
MEDICIONES Y FACTORES.

3.1 PROPUESTA DE FORTIFICACIÓN.

Para concretar la propuesta de fortificación se deben evaluar ciertas características de cada elemento de fortificación, determinando cual es mejor para adecuarse a las características geomecánicas de la mina Quintay. Se tienen contemplados de igual manera los lugares de mayor peligrosidad mediante un previo estudio de fallas presentes en la mina y los factores de la caída de material fragmentado desde las paredes de la mina.

3.2 FACTORES DE DESPRENDIMIENTO.

El macizo rocoso soporta grandes presiones en todas direcciones y se mantiene estable debido al equilibrio de fuerzas, al modificar el macizo mediante excavaciones o tronadura, el equilibrio de las fuerzas se ve perjudicado y si los esfuerzos superan en resistencia a la roca esta se deformará provocando agrietamiento o movimiento de material, el cual puede deslizarse o desprenderse.

Además de haber esfuerzos involucrados en la estabilidad de un macizo rocoso, influyen de igual manera factores como;

- Fallas
- Talud
- Presencia de agua
- Vibraciones
- Diaclasas
- Excavación
- Profundidad de la mina
- Calidad mecánica de la roca presente.

3.3 ZONAS DE PELIGRO.

En la mina Quintay, la roca presente es de calidad media lo cual indicaría que no necesita una fortificación rigurosa, sin embargo, hay sectores en donde la calidad del macizo rocoso es mala. Esto es principalmente debido a la presencia de un sistema de fallas, que a simple vista es fácil de identificar. Es por esto que se debe identificar las zonas principales de mayor peligrosidad.

3.3.1 Zona de tronadura

Las paredes de la mina donde cae la mayor cantidad de material fragmentado es desde las paredes de mas impacto recibe, debido a las tronaduras de avance (pared Noreste) y donde se presentan las fallas geológicas. Si bien de las paredes donde se realiza tronadura, se tiene previsto un desprendimiento de material, lo cual produce perdida o ralentización del proceso de producción de la mina, ya que el material desprendido cae en los caminos de acceso por donde transitan los camiones cargados de material, lo cual significa a su vez una interrupción al área de carguío y transporte.

3.3.2 Presencia de fallas.

Como ya fue mencionado, la mina presenta paredes que están muy fracturadas por la presencia de un sistema de fallas, por lo cual es en estas paredes que tendremos que hacer hincapié al proceso de fortificación.

Para hacer un análisis más detallado se realizo un estudio de estas fallas, para ubicarlas correctamente y determinar las zonas con mayor riesgo a desprendimiento de material desde las paredes con presencia de dichas fallas. Llevando a cabo el análisis, se utilizo el programa Dips de Rocscience, que consta de un análisis interactivo de diversas estructuras geológicas. Este programa entrega como resultado la concentración y posición de las zonas de debilidad que se generan a partir de las fallas presentes. Ver Figura 3-31.



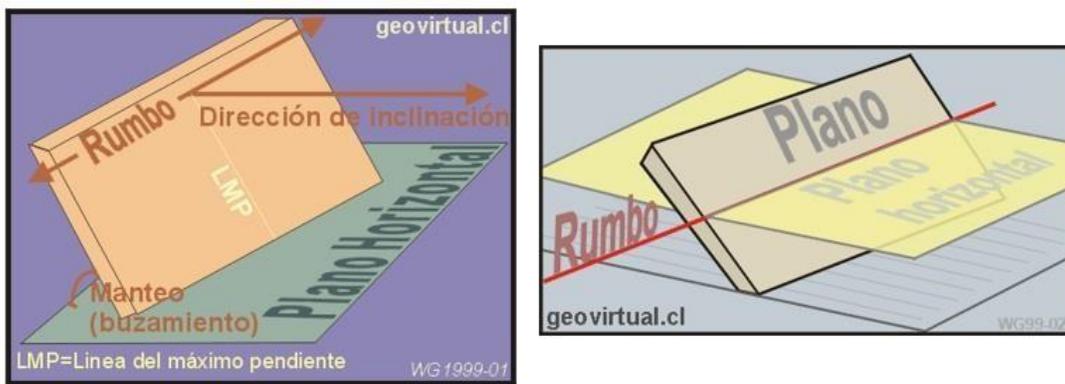
Fuente 61: Foto propia en terreno (pared Sureste)

Figura 3-31 Fallas identificables en minera Quintay pared Sureste de la mina.

3.4 DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN / RUMBO Y MANTEO.

Para comprender las características de la mina, principalmente asociadas a las condiciones del yacimiento y a sus factores geomecánicos, se hace necesario entender y comprender ciertos criterios relacionados a la geología estructural. Los cuales son necesarios para definir la orientación de los planos y fallas presentes. Ver Figura 3-32.

- Dirección de inclinación: La dirección de inclinación indica hacia donde se encuentra inclinado el plano respecto de la horizontal.
- Manteo o buzamiento: Corresponde al ángulo existente entre el plano a estudiar y el plano horizontal.
- Rumbo: Es la línea horizontal de un plano y también se puede definir como la línea resultante de la intersección del plano geológico por un plano horizontal.



Fuente 62: Geovirtual.cl, apuntes geología estructural

Figura 3-32 Concepto Rumbo, dirección de inclinación y manteo.

3.5 FALLAS Y MEDICIONES MINA QUINTAY.

Para caracterizar las fallas presentes en la mina se hizo una visita a terreno. En la cual, en conjunto con una brújula Brunton, la cual permite calcular el rumbo y manteo de una estructura geológica, se procedió a realizar la obtención de los datos necesarios.



Fuente 63: Foto propia en terreno.

Figura 3-33 Obtención de rumbo y manteo.

De esta manera se obtuvieron 4 sistemas de fallas enumerados del 0 al 3. Estos presentan características muy similares entre sí.

El primer sistema de fallas (numero 0) tiene un rumbo de N-87-W con un manteo de 80°NE. El segundo (numero 1) posee un rumbo de N-50-E con un manteo de 85°NW. El tercer sistema de fallas (numero 2) tiene un rumbo de N-26-W con un manteo de 59°NE. El cuarto y último sistema de fallas (numero 3) posee un rumbo de N-80-W con un manteo de 80°NE.



Fuente64: Foto propia en terreno.

Figura 3-34 Sistema de falla N°1.

3.5.1 Programa para estudio de fallas.

Como primer paso, para poder operar con el programa es necesario realizar una conversión de los valores de rumbo y manteo. Una vez realizada la conversión se obtendrán los valores de *Dip* y *DipDirection* que son los que el programa requiere en dos valores numéricos, en dos indicadores:

- *Dip*: corresponde al buzamiento.
- *DipDirection*: corresponde a la dirección de inclinación.

Para calcular estos valores se necesitará convertir mediante un sistema preestablecido los valores obtenidos de las fallas. El cual se basa en las direcciones del rumbo y de manteo, presentando un cálculo matemático frente a las distintas combinaciones que pudieran existir entre las direcciones obtenidas de las fallas estudiadas.

Tabla 3-27 Transformación DipDirection.

Condicionante	Dip Direction (dirección de inclinación)
Si el RBO está en dirección NW y MANTEO en SW	$DIP\ DIRECTION = 270 - RBO$
Si el RBO está en dirección NW y MANTEO en NE	$DIP\ DIRECTION = 90 - RBO$
Si el RBO está en dirección NE y MANTEO en NW	$DIP\ DIRECTION = 270 + RBO$
Si el RBO está en dirección NE y MANTEO en SE	$DIP\ DIRECTION = 90 + RBO$

Fuente 65: Guía utilización programa DipsRocscience

3.5.2 Conversión y grafica de interpretación.

Para poder hacer la conversión se necesita identificar el sistema de conversión correspondiente para cada caso. Es importante realizar este paso con mucha precaución puesto que, una identificación errónea significará un cálculo matemático totalmente diferente al que realmente correspondía.

Una vez aplicado el cálculo según el caso específico, se obtendrán el Dip y DipDirection, los cuales podrán ser ingresados en el programa.

- Sistema N° 0: Rumbo promedio: N-87-W, Manteo promedio: 80°NE.

$$\text{DipDirection} = 90 - 87$$

$$\text{DipDirection} = 3$$

- Sistema N°1: Rumbo promedio: N-50-E, Manteo promedio: 85°NW

$$\text{DipDirection} = 270 + 50$$

$$\text{DipDirection} = 320$$

- Sistema N°2: Rumbo Promedio: N-26-W, Manteo promedio: 59°NE

$$\text{DipDirection} = 90 - 26$$

$$\text{DipDirection} = 64$$

- Sistema N°3: Rumbo promedio: N-80-W, Manteo promedio: 80°NE

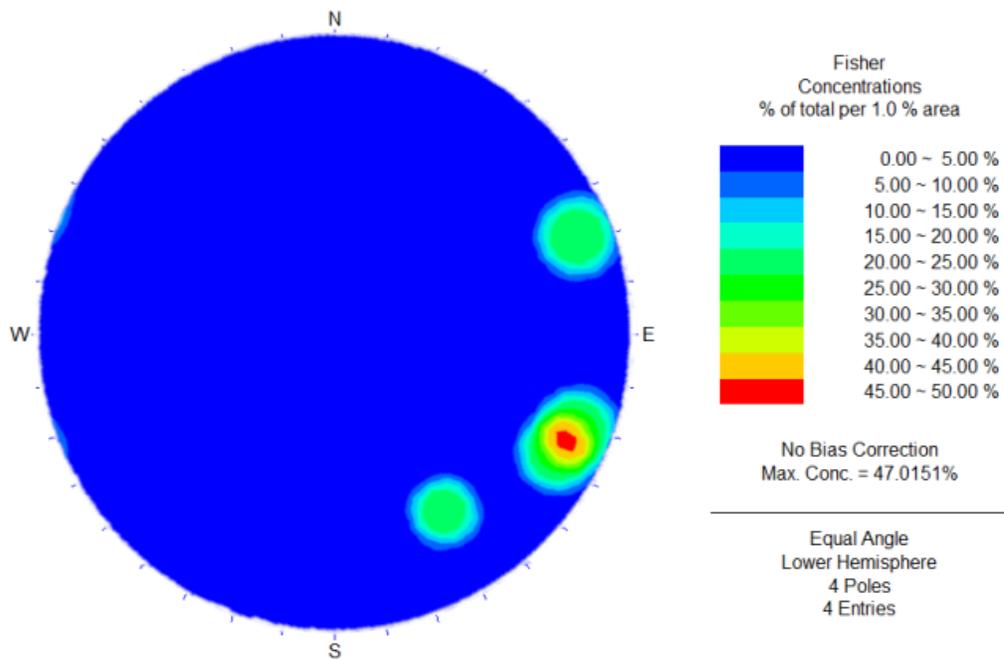
$$\text{DipDirection} = 90-80$$

$$\text{DipDirection} = 10$$

Tabla 3-28 Resumen de datos.

Enumeración del sistema de falla	Rumbo promedio (RBO)	Manteo promedio	Dip	Dip Direction
N°0	N-87-W	82°NE	82	3
N°1	N-50-E	82°SE	82	320
N°2	N-26-W	59°NE	59	64
N°3	N-80-W	80°NE	80	10

Fuente 66: Elaboración propia.



Fuente 67: Software Dip de Rocscience, elaboración propia

Figura 3-35 Proyección estereográfica de concentración en zonas de mayor debilidad mina Quintay.

En la ilustración anterior se puede apreciar la localización de los polos en donde se presenta la concentración de zonas con mayor debilidad en la mina, estos polos se diferencian de la estructura por el color. Como se puede observar la mayor cantidad de concentración se da en las zonas de color rojo, estas poseen un 45% a 50% de la concentración total de las zonas de debilidad. Este polo se encuentra en la zona sureste de la mina.

También se pueden encontrar fallas aisladas en menor grado de concentración, con concentraciones entre 25% y 30% estas se encuentran en la zona sureste y noreste de la mina, las cuales representan, con un color verde, un sector con debilitamiento más leve en comparación a la zona roja.



Fuente 68: Google Maps

Figura 3-36 Vista aérea de mina Quintay, ubicación de fallas.

3.6 ELECCIÓN ZONA DE FORTIFICACIÓN.

Para realizar una elección de la zona a fortificar se dividió la mina en 4 sectores. Ver Figura 3-37.



Fuente 69: Google Maps, elaboración propia

Figura 3-37 Paredes de la mina divididas en cuatro sectores.
(Noroeste – Noreste – Suroeste – Sureste).

- 1- Pared Noroeste: en esta pared de la mina no será necesaria una fortificación, ya que en este sector no hay presencia de fallas y tampoco hay presencia de mucho material fragmentado.
- 2- Pared Noreste: en esta pared se pudo localizar una zona de debilitamiento, pero mucho más leve que la encontrada en la zona sureste. Esta no presenta grandes peligros, por lo tanto, no necesita tanta atención.
- 3- Pared Suroeste: en esta pared no se encontró ningún tipo de falla. Esta es la pared en donde está la rampa de acceso a la mina. No necesitara de una fortificación.
- 4- Pared Sureste: es en esta pared de la mina donde están concentradas todas las zonas de mayor debilidad según el resultado de la gráfica del programa. Además el levantamiento geomecánico del capítulo 1, el punto 5 del levantamiento indicó que la calidad de este sector tenía una puntuación de 25 en la escala de RMR, lo cual dice que es de calidad mala, verificado por tabla en el mismo capítulo 1. Es por ello que la fortificación se deberá realizar en este sector de la mina.

3.7 ANÁLISIS DE ELEMENTOS A UTILIZAR.

Para poder proponer la mejor opción para la fortificación se hace necesaria una evaluación previa de cada uno de los elementos. Esta evaluación se hará respecto a las características geológicas y geomecánicas, como lo son la presencia de agua, fallas presentes, entre otras.

3.7.1 Perno

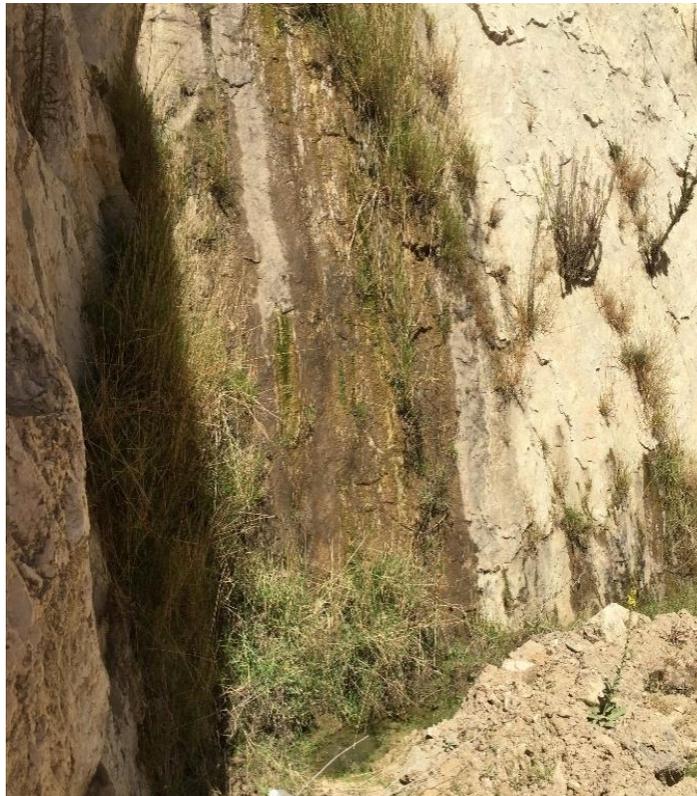
3.7.1.1 Perno anclado mecánicamente

Analizando este perno, sostiene diferentes características, las cuales no son las más adecuadas para la fortificación. Si bien pueden ser usados bajo cualquier tipo de geometría y puede ser anclado en rocas duras, este perno pierde efectividad cuando la roca de alrededor se fractura, tomando en cuenta que su capacidad de soporte se ve afectada por las vibraciones de la tronadura cercana. Y específicamente la zona a implementar la fortificación, en este caso la pared sureste, es una de las más fracturadas sin contar que cercana a esta zona se realizan tronaduras de avance.

3.7.1.2 Pernos anclados con cemento

Este perno es una buena opción para una fortificación, debido al tipo de anclaje que es para paredes con fracturas, lo cual sucede en este caso. Aunque se ven muy afectados por la presencia de agua, puesto que la lechada es de secado lento.

Algunas características del perno favorecen la elección, pero la presencia de agua por goteo que tiene la minera en la zona de la pared sur, hacen que el perno no sea el adecuado para su misma utilización.



Fuente 70: Foto propia en terreno.

Figura 3-38 Goteo de agua pared sur de la mina.

3.7.1.3 Pernos anclados con resina

Estos pernos representan una de las mejores opciones en cuanto a pernos se refiere ya que, su grado avanzado en adherencia para paredes con fracturas, y al ser utilizado con resina de fraguado rápido se podrá tensar rápidamente el perno, añadiendo una rápida sujeción para completar la fortificación de manera más eficaz, además la resina ofrece una buena protección contra la corrosión, un tema bastante probable de que ocurra debido a la presencia de agua.

Una de las características más atractivas para la elección de perno con resina, es la gran capacidad de soporte de vibraciones inducidas por tronadura, gracias a que la resina lo mantiene sujeto.

Si bien no todo es positivo, la desventaja de anclar pernos con resina, es la vida útil que posee la resina, aunque no debiera ser problema, puesto que esta fortificación está pensada de manera temporal, porque la mina va en constante expansión.

3.7.1.4 Perno Split set

Este tipo de perno al ser de una instalación muy simple, permitir fácil instalación de malla y además ser muy efectivo en roca muy fracturada, se presentaba como buena opción. Pero un condicionante crítico es la presencia de agua en el lugar, lo cual genera gran tendencia a la corrosión. Este perno se ve muy afectado y pierde su capacidad de soporte con la corrosión por lo cual queda descartado.

3.7.1.5 Perno Swellex

El perno Swellex puede ser utilizado en roca dura a blanda, representando una amplia gama de utilización en variedades de suelos. Otorga un refuerzo inmediato, además se acomoda a los movimientos del terreno y es la mejor opción para terrenos muy fracturados. Este perno en conjunto con el perno de resina son las mejores opciones para fortificar.

Factores que descartaron este perno para su elección, es la corrosión en el mismo ya que causa una reacción negativa, otro punto es que este perno no es utilizable en zonas cercanas a tronadura, puesto que una variación de agua o vibraciones en la perforación, harían que el perno pierda su eficacia.

3.7.1.6 Perno Helicoidal

Este perno dependiendo del diámetro es ideal para una fortificación temporal o definitiva, ya que están diseñados para resistir distintos tipos de esfuerzos, ya sea cortante o de tensión. Este es uno de los pernos más utilizados, tanto en minería como proyectos de taludes en carreteras para el área de construcción, con el fin de fortificar.

Dependiendo del complemento que utilice aumentara las características de resistencia, en este caso utilizarlo con resina es una buena opción, ya que al ser introducido con este aditivo, traba de forma inmediata al perno y agregando elementos de fijación, planchuela y tuerca, crea un sistema perfecto para el sostenimiento de fracturas de roca.

Si bien el largo en el cual se puede conseguir el perno es un máximo de 16 m, solo basta con 1,20 m para realizar la sujeción al macizo rocoso.

3.7.2 Malla

3.7.2.1 Malla electrosoldada y malla tejida

El tipo de malla que se utilizará en conjunto con los pernos será la malla tejida. Esto se debe a que la malla tejida es mucho más flexible que la malla electrosoldada. Es recomendable utilizar la malla electrosoldada en el caso que se desee instalar Shotcrete, cosa que en este caso no es así. Otro factor que determina la elección de la malla tejida es la capacidad que tiene para soportar bloques pequeños de roca. Lo que está presente, ya que la roca está bastante fracturada por la presencia de fallas además del disminuido valor en costo en cuanto a la comparación de una malla electrosoldada.

3.8 ANÁLISIS DE COSTO Y PROPUESTA FINAL.

En cuanto a un análisis técnico de las características de pernos más favorables y que más se adecuan a la mina, está la barra o perno helicoidal. Contando con durabilidad, alta resistencia a la tracción y compresión, utilizado en áreas de fracturas y en rocas competentes. Puede fijarse con una inyección de lechada o “resina”, que es la utilizada en este caso, como elección de aditivo. Y tiene una capacidad de soportar de 15 a 19 toneladas de fluencia y de 23 a 29 toneladas en ruptura mínimo, desde los 19 mm a los 25 mm aproximadamente comprende el diámetro de este perno y posee una calidad de acero A 630-420H.

La barra con hilo izquierdo se puede conseguir hasta en 12 metros de largo, con 1,20 metros bastara para la sujeción de cada barra, con espaciamiento de 1 a 1,20 metros entre pernos, correspondiente a la distancia mínima entre pernos permitida para fortificación. Si bien con la resina de fraguado rápido código verde bastará para la firmeza del perno, necesitamos una malla versátil y de mayor flexibilidad, en donde la malla tejida galvanizada será mejor elección, tipo 10006, recomendada para rocas con fractura por IMEL Mining rock. Con una apertura de 100 mm y 5,16 mm de espesor bastara. Con su respectiva fijación entre malla y perno gracias a las planchuelas cónicas de 200x200 mm y tuerca de acero bajo norma SAE 1045.

Cabe destacar que una malla electrosoldada es de excelente calidad pero es muy rígida para adecuarse a la forma del macizo rocoso, en esta mina.

En cuanto al análisis de costo se refiere, el perno más barato y con menos contras es también el perno helicoidal. Por ende, es el elegido a nivel técnico económico. Los demás pernos, Split Sets, Swellex, perno cable y demás pernos, aplican para otro tipo de roca, con características que los favorecen en su fortalezas de fortificación, y a su vez tienen un costo referencial bastante mayor para un presupuesto de pequeña minería.

La pared Sureste presenta mayor debilitamiento y fracturas, tiene una distancia de 30 m en donde se nota el material fracturado y una altura de talud de 3 m. Donde el espaciamiento entre pernos es de 1 m de alto y 1,5 m de ancho entre barreno. Si bien el diagrama es de 60 barrenados la barra helicoidal se consigue estándar de 2.9 m, al ser dividido queda en 1,45 m suficientes para cada perforación, necesitando de esta manera 30 pernos, 2 mallas tejidas y 30 resinas, añadiendo la compra de planchuelas para fijar cada perno.

Tabla 3-29 Análisis de costos

Elemento	Cantidad	Característica	Precio unitario	Precio cantidad
Perno	30	Helicoidal 22 mm	\$6	\$180
Malla	2	Tejida 2,5x25 m	\$209	\$418
Resina	30	4 min fraguado lento	\$5	\$150
Planchuela	30	Cónica 200x200 mm	\$2	\$60
Costo total	-	-	-	\$808

Fuente 71: Elaboración propia en base a datos obtenidos de empresas distribuidoras.

Esta tabla representa un análisis de costos asociados a una fortificación de talud para minería a cielo abierto. En el caso de minera Quintay es posible realizar la propuesta por 808 dólares aproximadamente, siendo posible de implementar y aumentar la seguridad de talud por el estado de roca afectado.

Si bien un análisis de costo conlleva diversos tipos de etapas, estas mismas se cumplen en el desarrollo de este trabajo de título, siguiendo una lista de tareas y acciones para llevar a cabo la fortificación de talud en la minera Quintay

Comenzando con una estimación temporal para el desarrollo de la propuesta, que una vez comenzado demorará una semana.

Los costos son una variable importante, que se divide en costos laborales internos, costos externos, comparación y cálculo de costos y materiales. Se realizará gasto laboral interno

al realizar las perforaciones e instalación de malla y pernos, actividad realizada por el mismo personal de la minera, para aminorar gastos de contratación de personal externo.

La comparación de precios y costo de material fue consultado a diferentes empresas, mediante investigación de tipo de elemento, categoría y características, dicha consulta está estipulada en Tabla 2-26 Consulta de materiales, capítulo 2.

El cálculo de la cantidad de materiales necesarios para utilizar en esta propuesta se define en la tabla 3-29 de análisis de costos, capítulo 3.

Todo este procedimiento e investigación, con el propósito de realizar una fortificación en los taludes con mayor debilidad, teniendo un alcance netamente de análisis de información y costos asociados para concretar una estimación de la propuesta final.

3.9 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Al realizar este trabajo, se logra comprender de mejor manera los diversos factores asociados a la caída de rocas y el cómo contrarrestar este fenómeno. Se logra reforzar los conocimientos anteriores, sobre en qué consiste la fortificación, su objetivo, lugares donde es aplicable y de que factores depende el diseño de la misma.

El desprendimiento de rocas es un fenómeno muy común tanto en minería subterránea como en minería de cielo abierto, por lo que es esencial saber cómo actuar frente a esta situación.

Se logró cumplir los 3 objetivos planteados en el principio:

- Identificar características del macizo rocoso en la minera de interés, según datos geológicos, buscando parámetros de vibración y puntos críticos que afecten a roca de mala calidad.
- Caracterizar alternativas de fortificación a través de una comparación de sus propiedades más significativas, asegurando la calidad del talud según parámetros de RMR.
- Evaluar técnica y económicamente la propuesta de fortificación según antecedentes geológicos, sistema de vibración y costos asociados determinando la factibilidad de implementación

Mediante el desarrollo de los capítulos se fue estudiando los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta para realizar una propuesta de fortificación, esto con el motivo de poder enfrentar un caso similar a futuro y tener los conocimientos necesarios para enfrentar un problema de esta magnitud, para proponer la mejor solución basada en datos técnicos reales y concretos.

Se llegó a la conclusión de que en la mina Quintay la calidad del macizo rocoso se ve perjudicada por variados factores. Uno de ellos es la presencia de grandes fallas en la pared sureste y las vibraciones inducidas por tronaduras cercanas a esta pared, genera un gran polo de debilidad. Otro factor que perjudica la calidad Geomecánica es la presencia de agua, esto se evidencia al fondo de la mina, donde el agua es acumulada.

Las mineralizaciones presentes también juegan un rol fundamental, puesto que la mina presenta en su gran mayoría roca de cuarzo y feldespato, las cuales, presentan muy buena calidad Geomecánica, pero que, al presentar impurezas como la biotita, disminuye enormemente su calidad Geomecánica. Es por ello que se propone una fortificación en la pared Sureste, con malla y pernos, para contrarrestar este punto de debilidad.

Finalmente se recomienda y espera que la propuesta de fortificación sea considerada por el dueño de la minera para la posible puesta en marcha.

Para que con esta implementación se vea favorecida la seguridad del lugar, con esto salvaguardar la vida de los trabajadores, integridad de los equipos y evitar corte de camino por derrumbe de material fragmentado.

Todo esto contribuye a una mejora en la producción de la mina, eliminando los tiempos perdidos, ya sea habilitando caminos o por un accidente que pueda sufrir un trabajador por caída de material al transitar en el sector.

4 BIBLIOGRAFÍA

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). Engineering Rock Mass Classification.

ROCSCIENCE INC. (2004). www.rocscience.com. Retrieved from [en línea]. https://www.rocscience.com/help/unwedge/webhelp/unwedge/Shotcrete_Support_Force.htm [consulta: 20 Mayo 2020]

C. LARA Y R. REZA. Caracterización Geomecánica del macizo rocoso para el diseño de las labores mineras e implementación de un sistema de fortificación. (2002).

GANNA, P., Wall, R. & Gutiérrez, A. (1996): Mapa Geológico del Área de Valparaíso-Curacaví 1: 100.000.- Sernageomin (Santiago).

GONZALES de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. Ingeniería Geológica. Madrid. Person Educación. 2002. 744 p.

H. BRITO, Perno Swellex – Labores mineras de fortificación (2015)

Sernageomin. www.sernageomin.cl Modificación reglamento minero

<https://www.sernageomin.cl/modificacion-reglamento/doc/documento.pdf>

<https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/05/Estad%C3%ADsticas-de-Accidentabilidad-Minera-2016.pdf>

IMEL– Catálogo cat70- PDF (2020)

Enaex2cap- (2018) Guía del explosivista www.enaex.com PDF

<https://www.enaex.com/wp-content/uploads/2018/02/Guia-del-Explosivista-FINAL.pdf>