

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

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA SISTEMA DE FORTIFICACIÓN
EN LA MINA PULLALLI

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Técnico Universitario en MINERÍA Y
METALURGÍA

Alumnos:

Marcelo Navarro Farías

Emilio Reyes Reyes

Profesor Guía:

Ing./Sr. Marcelo Eduardo Rojas Vidal

2018

RESUMEN

KEYWORDS: PULLALLI – FALLAS GEOLOGICAS – FORTIFICACIÓN.

El presente trabajo de título, tiene como objetivo el desarrollo de un estudio de pre-factibilidad técnica, el que consiste en una investigación de todos los factores que influyen para una propuesta de fortificación de las labores de producción que presenten fallas geológicas significantes, en la mina subterránea C.M. Pullalli Ltda. ubicada en la V región de Chile, adecuándose a las condiciones de la este yacimiento, relacionado a su geología, método de explotación e infraestructura. Teniendo presente que la fortificación es un procedimiento esencial en minería subterránea, tanto para un buen trabajo, como para la seguridad de los equipos mineros y personal. Como la seguridad minera es un ámbito que nunca debiese ser descuidado, debido a que, desde los inicios de la minería ha habido accidentes fatales o incapacitantes.

Con este trabajo se busca crear un estudio de pre factibilidad de una propuesta de fortificación que sirva como base para la compañía dueña de la mina, y así poder ser modificada, e integrada a las diversas condiciones de la mina. En el primer capítulo se da a conocer las características principales de la mina, explicando su geología, litología, método de explotación. A su vez se mencionarán las fallas geológicas más significantes que se encuentran en el yacimiento subterráneo, estudiando y evaluando el macizo rocoso de acuerdo a diferentes herramientas que se emplean hoy en día, seleccionando el sector más vulnerable para poder emplear un método de fortificación.

El segundo capítulo será enfocado a definir los diferentes métodos de explotación empleados hoy en día en la minería subterránea, analizando sus características más significativas y haciendo un hincapié en el Decreto Supremo 132 de Seguridad Minera, en cuanto a la fortificación y caída de rocas para poder eliminar toda causa posible de accidente dentro de ella, dependiendo de la estabilidad de la roca, pero también teniendo en cuenta una posible forma inestable del macizo rocoso.

Finalmente, en el tercer capítulo, se sugerirá la alternativa más idónea del método de fortificación que se debiera emplear para la labor que se encuentre más debilitada y peligrosa en cuanto a inestabilidad del macizo rocoso, respecto a lo estudiado en los capítulos anteriores y el conocimiento obtenido en transcurso del tiempo y se describirá la manera de ejecutarlo.

ÍNDICE

RESUMEN	
SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 1: IDENTIFICAR LA ZONA DE DISCONTINUIDAD GEOMECÁNICA MÁS VULNERABLE EN LA MINA PULLALLI POR MEDIO DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DE TERRENO, EVALUANDO LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN SUS PRINCIPALES CASERONES.	3
1.1. MINERA PULLALLI	5
1.1.1. Ubicación geográfica	7
1.1.2. Clima	7
1.2. GEOLOGIA DEL YACIMIENTO	8
1.3. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN EMPLEADO EN EL YACIMIENTO	8
1.3.1. Especificaciones del método	9
1.3.2. Ejecución	9
1.3.3. Arranque y manejo de mineral	9
1.3.4. Ventajas y Desventajas	10
1.4. CONCEPTOS RUMBO-MANTEO DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN	10
1.5. FALLAS GEOLÓGICAS PRESENTES EN EL MACIZO ROCOSO	11
1.5.1. Fallas mayores existentes	13
1.5.2. Fallas menores existentes	15
1.6. SELECCIÓN DE LA ZONA MÁS VULNERABLE PARA FACTIBILIDAD DE FORTIFICACION	18
1.6.1. Caserón Silvana	18
1.6.2. Calidad geomecánica del macizo rocoso en el Caserón Silvana	19
1.6.3. RMR Pilar principal del Caserón Silvana	22
1.6.4. RMR Pilar rampa de acceso Caserón Silvana	23
1.6.5. RMR Pilar Entrada a Caserón Silvana	24
1.6.6. RMR Pilar Este del Caserón Silvana	25
1.6.7. Análisis de RMR Caserón Silvana	26

CAPÍTULO 2: ANALIZAR LOS DISTINTOS MÉTODOS DE FORTIFICACIÓN A TRAVÉS DE UNA COMPARACIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS. **27**

2.1.	¿POR QUÉ SE DEBE FORTIFICAR Y ACUÑAR?	29
2.2.	CAIDAS DE ROCAS	30
2.3.	ACUÑADURA	31
2.3.1.	Herramientas para acuñar manualmente	33
2.3.2.	Dirección de avance al acuñar	34
2.3.3.	Posición para acuñar	34
2.3.4.	Postulado de acuñadura	35
2.4.	FORTIFICACIÓN	35
2.5.	CLASIFICACIÓN DE LA FORTIFICACIÓN	36
2.5.1.	Fortificación activa	36
2.5.2.	Fortificación pasiva	37
2.5.3.	Fortificación combinada	38
2.6.	TIPOS DE FORTIFICACIÓN	38
2.6.1.	Fortificación con madera	38
2.6.2.	Fortificación con marcos metálicos	39
2.6.3.	Fortificación con mallas de acero	41
2.6.4.	Fortificación con Shotcrete	43
2.6.5.	Fortificación con pernos	45
2.7.	TIPOS DE PERNOS DE FORTIFICACIÓN	45
2.7.1.	Pernos con anclajes expansivos	45
2.7.2.	Pernos de fricción (Split Set y Swellex)	46
2.7.3.	Pernos cemento/resina	46
2.7.4.	Perno helicoidal	47

CAPITULO 3: SELECCIONAR EL METÓDO DE FORTIFICACIÓN MÁS FACTIBLE PARA EL YACIMIENTO, REFERENTE A LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ESTUDIOS EMPÍRICOS Y CONOCIMIENTO ACADÉMICO ADQUIRIDO EN LA UNIVERSIDAD , CON EL FIN DE MEJORAR LAS OPERACIONES EN LA MINA. **49**

3.1.	FACTORES QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE UN METÓDO DE FORTIFICACIÓN	51
3.1.1.	Parámetros Geotécnicos-Geomecánicos	51
3.1.2.	Parámetros Operacionales	53

3.2.	SELECCIÓN DEL METÓDO DE FORTIFICACIÓN BASADO EN LOS FACTORES Y PREPOSICIÓN DE BIENIAWSKI.	55
3.3.	SECUENCIA OPERACIONAL Y GENERALIDADES DE LOS METÓDOS DE FORTIFICACIÓN SELECCIONADOS.	57
3.3.1.	Empleo de perno helicoidal con malla	57
3.3.2.	Empleo de perno Split-Set con malla	59
3.3.3.	Proyección del shotcrete	60
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Ubicación de los caserones principales en explotación	6
Figura 1-2.	Ubicación geográfica C.M. PULLALLI	7
Figura 1-3.	Concepto: Rumbo, Dirección de inclinación, Manteo	11
Figura 1-4.	Movimiento de fallas geológicas	13
Figura 1-5.	Proyecciones estereográficas de concentración en zonas de mayor debilidad en la mina Pullalli	15
Figura 1-6.	Proyecciones estereográficas de concentraciones en zonas de intermedia debilidad en la mina Pullalli	17
Figura 1-7.	Caserón Silvana	19
Figura 1-8.	Clasificación del macizo rocoso según Bieniawski	22
Figura 1-9.	Pilar principal cas. Silvana	23
Figura 1-10.	Pilar de rampa de acceso	24
Figura 1-11.	Pilar de entrada	25
Figura 1-12.	Pilar Este	26
Figura 2-1.	Accidente por caída de rocas	30
Figura 2-2.	Fuerzas que convergen hacia el vacío de un caserón	31
Figura 2-3.	Tipo de barretilla	33
Figura 2-4.	Tipos de punta barretillas	34
Figura 2-5.	Dirección de avance y posición para acuñar	35
Figura 2-6.	Acuñadura Manual	35
Figura 2-7.	Pernos de fricción Split-Set	37
Figura 2-8.	Fortificación con malla de alta resistencia	37
Figura 2-9.	Sistema de shotcrete con malla y perno	38

Figura 2-10.	Estructura marcos de madera	39
Figura 2-11.	Marcos metálicos rígidos	40
Figura 2-12.	Marcos metálicos deslizantes	41
Figura 2-13.	Malla trenzada	42
Figura 2-14.	Malla soldada	43
Figura 2-15.	Proyección manual por vía húmeda y seca respectivamente	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Ventajas y Desventajas del Sublevel Stopping	10
Tabla 1-2.	Tendencia de fallas mayores	13
Tabla 1-3.	Calculo del Dipdir	15
Tabla 1-4.	Actitud de fallas menores	16
Tabla 1-5.	Resultados obtenidos mediante ensayo P.L.T.	20
Tabla 1-6.	Valores máximo, mínimo y promedio	20
Tabla 1-7.	Puntaje de parámetros del RMR	21
Tabla 1-8.	RMR Pilar Principal Cas. Silvana	22
Tabla 1-9.	RMR Pilar rampa de acceso	23
Tabla 1-10.	RMR Pilar de entrada	24
Tabla 1-11.	RMR Pilar Este	25
Tabla 3-1.	Clasificación de las rocas y sus propiedades físicas mecánicas	52
Tabla 3-2.	Preposición de Bieniawski, Rock Mass Rating	55

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

ACHS	:	Asociación Chilena de seguridad
B	:	Bieniawski
Cas	:	Caserón
CIP	:	Carbón in Pulp
CM	:	Compañía Minera
E	:	Este
ID	:	Identificación
ISRM	:	International Society for Rock Mechanics
Ltda.	:	Limitada
N	:	Norte
NE	:	Noreste
NNW	:	Nornoroeste
NW	:	Noroeste
P.L.T.	:	Point Load Test
RBO	:	Rumbo
RMR	:	Rock Mass Rating
RQD	:	Rock Quality Designation
S	:	Sur
SE	:	Sureste
Sernageomin: Servicio nacional Geología y minería		
SLS	:	Sublevel Stopping
SW	:	Suroeste
UCS	:	Uniaxial Compressive Strength
UTM	:	Universal Transversal Mercator
W	:	Oeste

B. SIMBOLOGÍA

&	:	Y
%	:	Porcentaje
°	:	Grados Dirección de Inclinación en un sistema Sexagesimal

<	:	Menor
>	:	Mayor
cc	:	Centímetros cúbicos
Cm	:	Centímetro
Km	:	Kilómetros
Km ²	:	Kilómetros cuadrados
lt	:	Litros
m	:	Metros
m ³	:	Metros cúbicos
mm	:	Milímetros
Mpa	:	Mega Pascales
°C	:	Grados Celsius
seg	:	Segundos
Ton	:	Tonelada

INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad que genera la mayor parte de los ingresos de Chile, por la riqueza natural de sus variados minerales, los cuales se exportan a distintos lugares del mundo, es por esta razón que la actividad minera no puede detenerse, ya que implicaría una pérdida millonaria por cada día que esta se encuentre paralizada. Por otra parte, como en toda actividad laboral, existen riesgos asociados a las acciones de las personas y las energías que se encuentran en su entorno. En la minería, en particular, dichos peligros se generan o están presentes en la extracción de grandes cantidades de volumen del cuerpo mineralizado, lo que genera la pérdida del equilibrio en las fuerzas convergentes, especialmente debido a la dificultad que significa mover toneladas de rocas y minerales, a través, de los diferentes métodos de explotación permitidos.

Uno de los riesgos más importantes e impelentes son la caída de roca, debido a diferentes factores como, por ejemplo, las discontinuidades de un macizo rocoso, es decir, una fisura, grieta, fractura que normalmente presentan un plano de debilidad. Existen distintos tipos de discontinuidades, entre ellas las diaclasas (discontinuidades que no presentan desplazamiento), el pliegue (estructuras formadas por la acción de esfuerzos que tienen naturaleza de ajuste y/o separación deformando la roca hasta su ruptura) y las fallas geológicas (fractura frágil a lo largo de lo cual ha ocurrido un desplazamiento visible, es decir, un plano que limita dos bloques de rocas y que se mueven de manera de que un bloque se desplaza con relación al otro).

Con el fin de dar sostenimiento y/o reforzar el contorno de las excavaciones, resguardar la integridad física de los trabajadores, además de instalaciones, equipos y el negocio minero, se le instala un sistema de soporte a la labor denominado en minería como fortificación, el cual puede ser considerado el método más efectivo y en algunos casos el único capaz de garantizar las dimensiones requeridas para la excavación y satisfacer al mismo tiempo las necesidades de producción en el periodo de explotación minera.

En la región de Valparaíso, en la localidad de Pullalli, referente a la comuna de la Ligua, está ubicado el yacimiento de Sulfuro Aurífero perteneciente a la Compañía Minera Pullalli Ltda., en el cual se extrae y procesa oro, a través, del método de explotación Sublevel Stopping, conocido en español como extracción mediante subniveles y caserones.

Este yacimiento presenta discontinuidades, lo cual es riesgoso para los trabajadores, ya que el macizo rocoso puede ceder en cualquier momento y ocasionar un accidente. Es por esto, que se propondrá un sistema de fortificación donde el yacimiento se encuentre más debilitado, evaluando geomecánicamente los pilares principales del

cuerpo mineralizando en sus principales caserones, para mantener la labor estable cuando su condición no sea auto soportable, ya sea mediante la utilización de marcos metálicos y/o enmaderados, pernos, mallas, Shotcrete o una combinación de ellos.

Para ello se analizarán estos métodos de fortificación, a través, de una comparación de sus características significativas, desde el punto de vista geomecánico directamente de la mina, para así poder determinar el método más factible, con el fin de satisfacer las exigencias técnicas, productivas y económicas, y al mismo tiempo poder contribuir a la seguridad del personal y los equipos de la mina.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema de fortificación para el sector con mayor concentración de fallas geológicas, en la zona más crítica existente en los principales caserones de producción de la mina Pullalli, mediante estudios empíricos y conocimiento académico obtenido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar la zona de discontinuidad geomecánica más vulnerable en la mina Pullalli por medio de recopilación de información bibliográfica y en terreno, evaluando la calidad del macizo rocoso en sus principales caserones.
2. Analizar los distintos métodos de fortificación, a través, de una comparación de sus características significativas.
3. Seleccionar el método de fortificación más factible para el yacimiento, referente a la calidad de macizo rocoso mediante estudios empíricos y conocimiento adquirido en la universidad, con el fin de mejorar las operaciones de la mina.

**CAPÍTULO 1: IDENTIFICAR LA ZONA DE DISCONTINUIDAD
GEOMECÁNICA MÁS VULNERABLE EN LA MINA PULLALLI POR MEDIO
DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DE TERRENO,
EVALUANDO LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN SUS PRINCIPALES
CASERONES.**

1. IDENTIFICAR LA ZONA DE DISCONTINUIDAD GEOMECÁNICA MÁS VULNERABLE EN LA MINA PULLALLI POR MEDIO DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DE TERRENO, EVALUANDO LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN SUS PRINCIPALES CASERONES.

Uno de los riesgos más importantes e impelentes en la minería son la caída de roca, debido a diferentes factores como por ejemplo las discontinuidades de un macizo rocoso. Estos pueden presentar riesgos para el personal que trabaja, para mantener la mina activa.

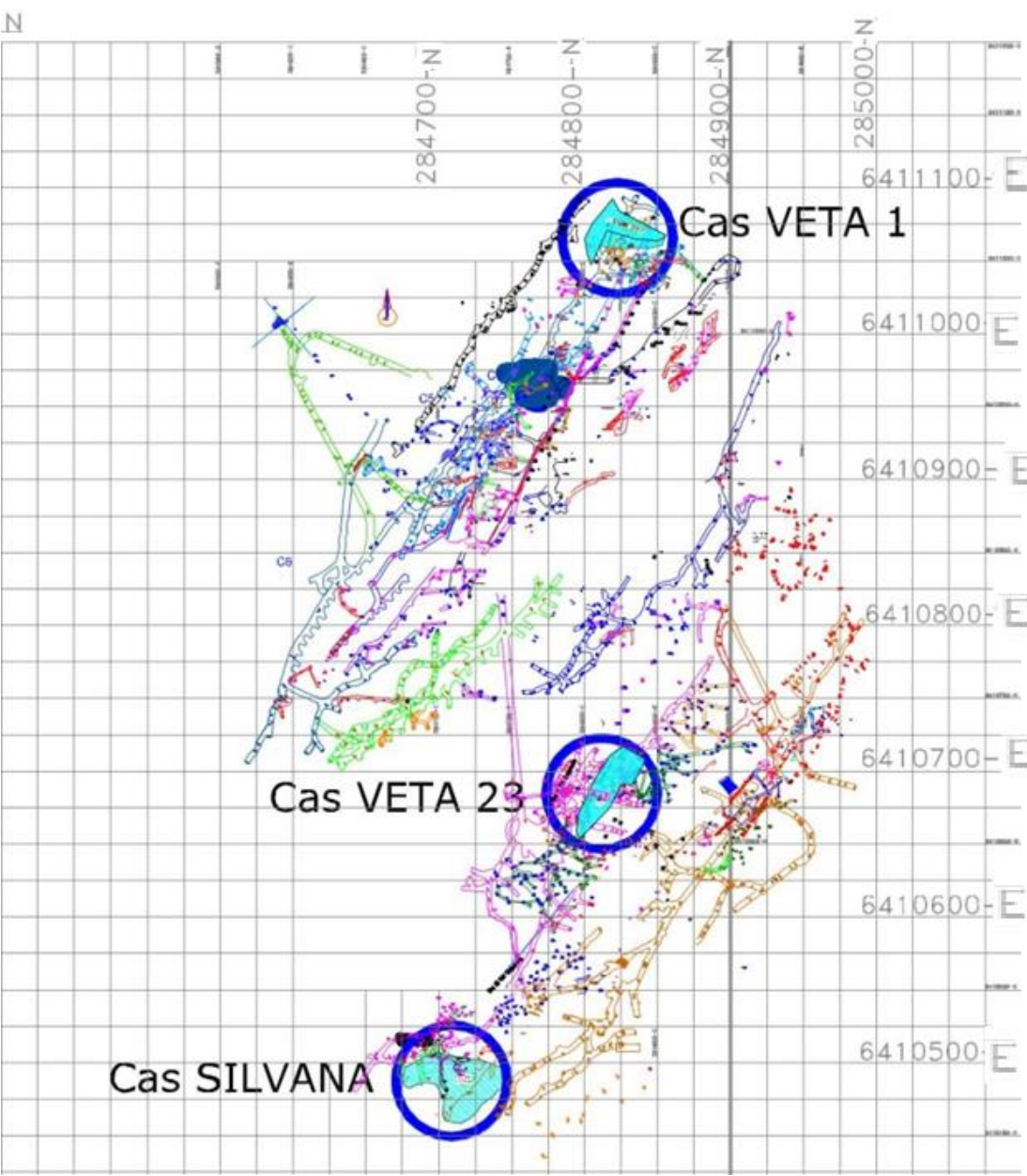
El presente capítulo trata del estudio de las fallas, desde los puntos de vista geológicos y geomecánicos, como base para comprobar la estabilidad de una excavación subterránea en función de su tipología y el comportamiento mecánico con el fin de reconocer la existencia de una falla.

1.1. MINERA PULLALLI

La mina C.M. Pullalli Ltda. se trata de una mina subterránea para la extracción de oro y plata, que en la actualidad se explota mediante el denominado método Sublevel Stopping (SLS) o extracción mediante subniveles y caserones. Los cuerpos mineralizados, que son una ampliación de las vetas auríferas principales, mantienen una marcada tendencia NE con manteos de 50 grados hacia el NW y dimensiones de referencia del orden de 100 m. de largo, por 15 m. de ancho y hasta 60 m. de alto aproximadamente.

Esta mina subterránea, presenta una planta de procesamiento a unos 10 kilómetros de la mina que se compone de un chancador primario y dos chancadores secundarios, un hidrociclón que cumple la función de clasificar partículas, un molino de bolas y tres estanques de lixiviación agitada, en donde se utiliza soda cáustica y amoníaco como reactivos de lixiviación, el siguiente proceso consta en adsorber el oro diluido por el reactivo, en carbón activado denominándose C.I.P. (Carbón in Pulp) o carbón en pulpa, en ocho reactores llamados pachucas. Se procesa 500 ton/día de mineral en la planta y estos carbones cargados en oro, son cosechados todos los fines de mes en camiones, para ser transportados, procesados en hornos y convertidores a alta temperatura, obteniendo el metal con una pureza de 99,6%

En la actualidad la mina cuenta con 17 niveles y la topografía de superficie es irregular con una fuerte pendiente hacia el NE. La ubicación de los caserones de producción denominándose Caserón Veta 1, Caserón Veta 23 y Caserón Silvana que están en explotación, demostrada es la siguiente figura: (Ver Figura 1-1)



Fuente: Plano Isométrico Mina Pullalli

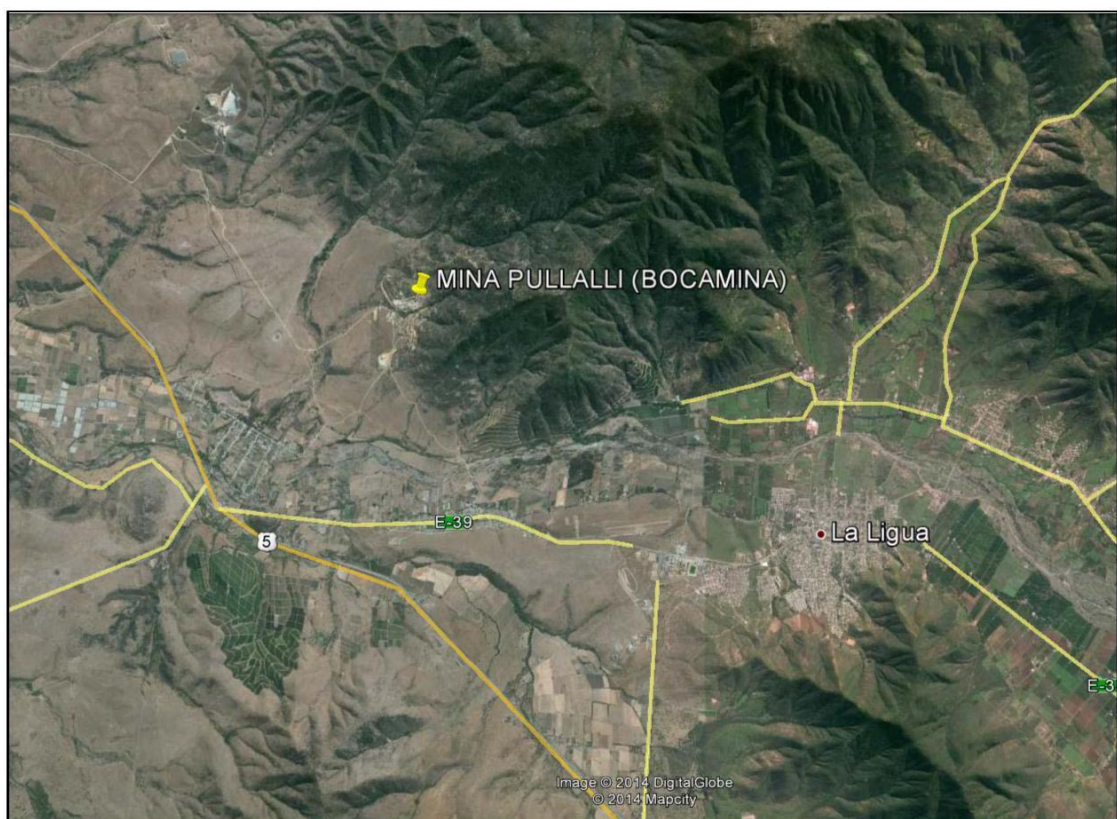
Figura 1-1. Ubicación de los caserones principales en explotación

Como es posible apreciar en la figura anterior (Ver Figura 1-1) el Caserón Veta 1 se ubica geográficamente en el Noreste de la mina Pullalli, en cambio el Caserón Silvana se sitúa en el Sur de la mina orientado al Este como al Oeste casi centrado, por

último, el Caserón Veta 23 se ubica casi al centro del yacimiento minero más situado al Sur que al Norte, ligeramente orientado al Este

1.1.1. Ubicación geográfica

La faena de Compañía Minera Pullalli, Ltda. se encuentra en la comuna de La Ligua, en la localidad de Pullalli, perteneciente a dicha comuna. Las coordenadas UTM donde se sitúa el acceso principal a la mina son N6410524.00 y E284538.00. (Ver Figura 1-2)



Fuente: Google Earth, Elaboración Propia

Figura 1-2. Ubicación geográfica C.M. PULLALLI

1.1.2. Clima

El clima se identifica por cielos puros debido de la baja humedad atmosférica, cielos despejados y alta luminosidad. La temperatura promedio anual es de 17.8°C, no recibe influencia oceánica. Se presenta una gran amplitud térmica, generando diferencias de hasta 9.2°C entre el mes más cálido y el mes más frío en promedio.

Las lluvias son escasas e irregulares por lo que las sequías son frecuentes en el valle de Petorca y La Ligua, a pesar que las precipitaciones anuales sobrepasan los 200 milímetros que se producen en invierno.

1.2. GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

En el área de la mina Pullalli, aflora una secuencia volcanoclástica de edad triásica media, atribuida a la formación de La Ligua, que es interpretada como un centro volcánico félsico originado por un evento volcánico extrusivo e intrusivo, subaéreo y en parte subacuático, desarrollado en una zona de rifting, zona donde la corteza terrestre en las que aparecen fisuras y fallas como consecuencia de la divergencia de dos placas tectónicas. La secuencia volcanoclástica está sobre yacida por conglomerados cuarcíferos y areniscas gruesas de la formación Quebrada del Pobre de edad Jurásica inferior. Ambas unidades están instruidas por granodioritas y tonalitas de la unidad Cavilolén y por diques andesíticos y stocks microdioríticos. La secuencia volcanoclástica asignada a la formación de La Ligua está afectada por una foliación penetrativa que oculta la estratigrafía y oblitera la textura original de las rocas producto de una deformación dúctil. Sobrepuesta a la anterior se reconoce una deformación frágil que genera los sistemas de fallas NNW, NW y EW.

La alteración hidrotermal en el área del proyecto es intensa y afecta a riolitas, tobas y sedimentos y se reconoce por aproximadamente 9 km², la alteración cuarzo sericita se relaciona con un intrusivo emplazado en profundidad; la silicificación de la matriz de las rocas y la introducción de cuarzo microcristalino en vetillas, brechas hidrotermales y vetas, es un evento múltiple y tardío a la alteración cuarzo sericita.

El yacimiento aurífero Pullalli, ocupa el margen occidental del centro volcánico félsico, se distribuye en un área elongada en dirección NE de 1,0 Km de largo por 0,5 Km de ancho. Tiene un fuerte control a lo largo de estructuras NE 50°, con inclinaciones entre la vertical y 30 ° al W, que se interpretan como fallas lítricas.

1.3. METÓDO DE EXPLOTACIÓN EMPLEADO EN EL YACIMIENTO

Debido a las características geológicas donde se origina la mina, a las características del yacimiento (Buzamiento, potencia y mineralización) y a la condición

subterránea de este, se utiliza el método Sublevel Stopping que se emplea principalmente en yacimientos tipo veta (verticales) con una gran potencia (ancho o espesor) mayor a 10 metros, donde lo esencial es que la roca sea de buena competencia y pueda mantenerse estable cuando el caserón se vaya vaciando.

1.3.1. Especificaciones del método

La extracción de mineral a través del método de explotación Sublevel Stopping depende principalmente en dividir el macizo en niveles para ser explotado, el arranque del mineral se realiza mediante zanjás o embudos verticales situados en la parte inferior del yacimiento donde las perforaciones se ejecutan de manera ascendente y descendente desde los subniveles creados previamente, termina por dejar el caserón vacío extrayendo toda la masa de mineral.

El mineral tronado se recolecta por medio de las zanjás recolectoras las que se encuentran conectadas a la rampa principal, transportando el mineral al sector de acopio.

1.3.2. Ejecución

- Nivel Base: Consiste en una galería principal de transporte y carguío que habilitan la extracción del mineral.
- Zanja: Corresponde al nivel donde se recolecta el mineral, se utiliza en mayor medida una zanja continua a lo largo de la base del caserón.
- Galerías o subniveles de perforación: Son niveles que se encuentran ubicados a distintas alturas, de acuerdo a las características geométricas del cuerpo mineralizado.
- Chimeneas: Consiste en labores que cumplen variadas funciones, principalmente ventilación, pero en este método a partir de ellas se aplica el primer corte, el cual sirve como cara libre para realizar las primeras tronaduras.

1.3.3. Arranque y manejo de mineral

Para efectuar la extracción del mineral se perforan tiros radiales a partir de los subniveles en manera de abanico, los cuales alcanzan los 30 m de distancia, con un diámetro de 2 a 3 pulgadas, estas perforaciones son ejecutadas preferencialmente con jumbos electro-hidráulicos.

La maniobra de voladura se realiza de manera independiente, ya que se puede ejecutar una gran cantidad de barrenos sin necesidad de tronar de forma inmediata. El

mineral tronado se recoge de forma inmediata a través de los buzones, un problema que se presenta al realizar la operación de esta forma es la presencia de bolones, por lo que se debe instalar parrillas para un mayor control sobre el mineral. Luego el mineral es trasladad desde la estación de carguío, hasta la rampa principal.

1.3.4. Ventajas y Desventajas

Como cualquier método de explotación, el Sublevel Stoping posee tanto pros, como contras demostrados en la siguiente tabla (Ver Tabla 1-1), sin embargo, esta es la manera más apta para explotar el cuerpo mineralizado de la mina Pullalli, según los ingenieros de la mina.

Tabla 1-1. Ventajas y Desventajas del Sublevel Stoping

Ventajas	Desventajas
Tasa de producción alta aproximadamente 25000 ton/mes.	Producto de la voladura se puede producir gases que vuelvan al caserón.
Alta Recuperación, sobre 90%	Ineficientes a bajas inclinaciones.
Muy favorable para mecanización	Gran cantidad de desarrollos, antes de iniciar la producción.
Baja dilución.	No Selectivo.

Fuente: Elaboración Propia conocimientos adquiridos clase método de explotación

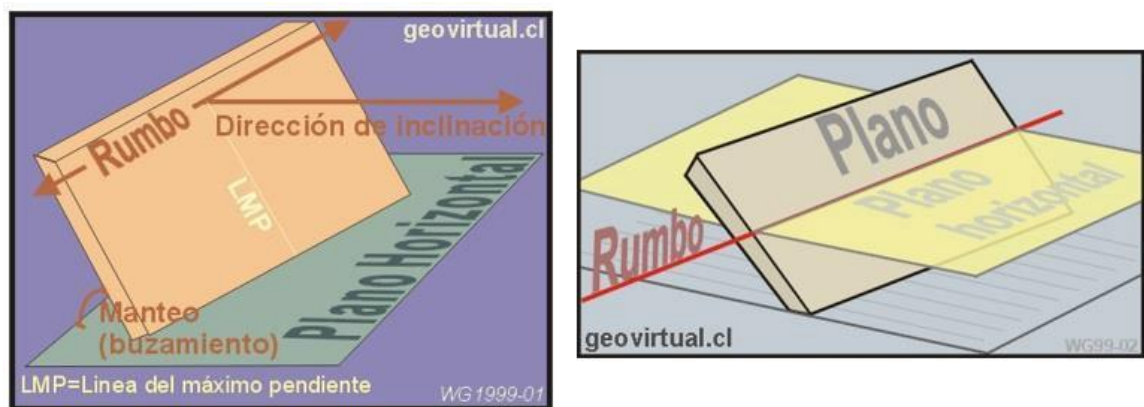
1.4. CONCEPTOS RUMBO-MANTEO DIRECCIÓN DE INCLINACIÓN

Para lograr entender las características más a fondo de la mina primordialmente, ligadas a las condiciones del yacimiento y a sus factores geomecánicos, se hace complementario entender y comprender ciertos criterios relacionados a la geología estructural, necesarios para definir la orientación de los planos, en este caso yacimiento y los sistemas de las fallas presentes.

Dirección de inclinación: La dirección de inclinación (Dip direction), indica hacia donde se encuentra inclinado el plano respecto del plano horizontal.

Manteo o buzamiento: Corresponde al ángulo existente (Dip) y mide el ángulo 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, (Ver Figura 1-3).



Fuente: Geovirtual.cl, apuntes geología estructural

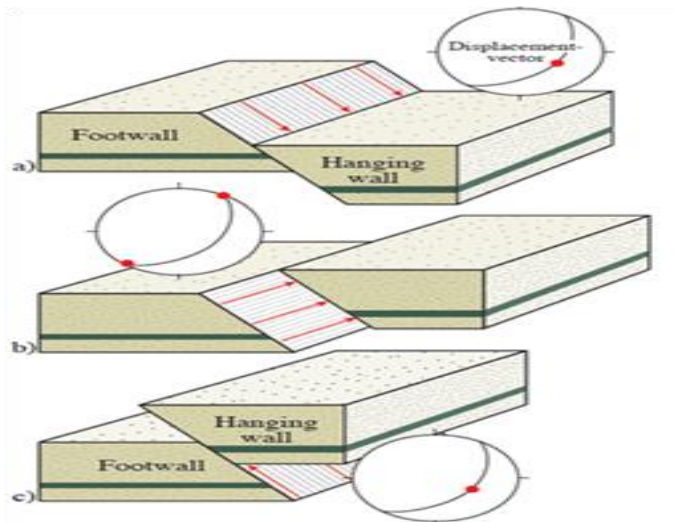
Figura 1-3. Concepto: Rumbo, Dirección de inclinación, Manteo

1.5. FALLAS GEOLÓGICAS PRESENTES EN EL MACIZO ROCOSO

Uno de los factores más característico que alteran las condiciones del macizo rocoso, es la presencia de fallas, las cuales representan un tipo de fracturas en la roca, acompañada con desplazamiento generando diversas zonas de cizallamiento, a lo largo de la estructura. Sin embargo, el comportamiento de la roca en la mina se ve alterado por diversos factores como la presencia de fallas, discontinuidades, fracturas, entre otros, las que modifican e influyen en gran medida en el comportamiento de la roca y su resistencia frente a los diversos esfuerzos que le son aplicados.

Para lograr comprender las características más a fondo de las fallas geológicas, primordialmente ligadas a las condiciones del yacimiento, es necesario entender y comprender ciertos criterios relacionados a la geología estructural, necesarios para definir los sistemas de las fallas geológicas presentes.

- Discontinuidad: Cualquier plano de origen geomecánico (rotura) o sedimento en un macizo rocoso, con corte (fisura, grieta, fractura), que normalmente muestra una resistencia a la tracción nula o muy baja. Confieren un comportamiento discontinuo y no uniforme al macizo rocoso y en cualquier caso presentan un plano de debilidad.
- Discontinuidades planas que atraviesan la roca y cuya génesis está asociada a uno o más procesos geológicos. Pueden ser de distintos tipos:
- Diaclasas: Discontinuidades que no presentan desplazamiento y se encuentran agrupadas paralelas unas con otras en familias o en juegos de diaclasas, cabe resaltar que varios juegos de diaclasas pueden interceptarse para así formar bloques rocosos de geometría ideal y de tamaños considerables.
- Pliegue: Son estructuras formadas por la acción de esfuerzos que tienen naturaleza compresiva (ajuste) y/o tractiva (separación) deformando a la roca hasta su ruptura. La deformación se da en rocas que han sido sometidas a esfuerzos dentro de un contexto plástico en el cual luego de aplicada la fuerza deformante la roca no recuperara su estado original (forma y volumen).
- Falla geológica: Una falla es por definición una fractura frágil a lo largo de la cual ha ocurrido un desplazamiento visible, en general paralelo a la superficie de la misma (Ver Figura 1-4). Es decir, una discontinuidad física de la roca, un plano que limita dos bloques de rocas y que se mueven de manera de que un bloque se desplaza con relación al otro. Por su parte una zona de falla se encuentra compuesta por innumerables superficies de fallas frágiles, sub paralelas e interconectadas, estrechamente espaciadas conteniendo rellenos de falla llamados brechas de falla. Existen fallas ínfimas y fallas que abarcan kilómetros de distancia.



Fuente: Geovirtual.cl, apuntes geología estructural

Figura 1-4. Movimiento de fallas geológicas

1.5.1. Fallas mayores existentes

En la mina C.M. Pullalli se observan principalmente cinco sistemas de fallas mayores, información aportada por el área de geología, denominando estas fallas como: Campamento, Sur, Claudia, Quebrada Pit y María Luisa, (Ver Tabla 1-2). Representando respectivamente su rumbo y su manteo en la siguiente tabla:

Tabla 1-2. Tendencia de fallas mayores

FALLAS MAYORES				
Falla	Rumbo	Manteo	Dip (°)	Dipdir (°)
Campamento	N43E	50NW	50	313
Sur	N33E	48NW	48	303
Claudia	N45E	40NW	40	315
Quebrada Pit	N50E	50NW	50	320
María Luisa	N45E	40NW	40	315

Fuente: Informe de geología mina C.M. Pullalli

Estas discontinuidades geomecánicas se representarán mediante proyección estereográfica utilizando el software DIPS de Rocscience. Este sistema se basa en las direcciones tanto del rumbo y del manteo, presentando así un cálculo matemático frente a

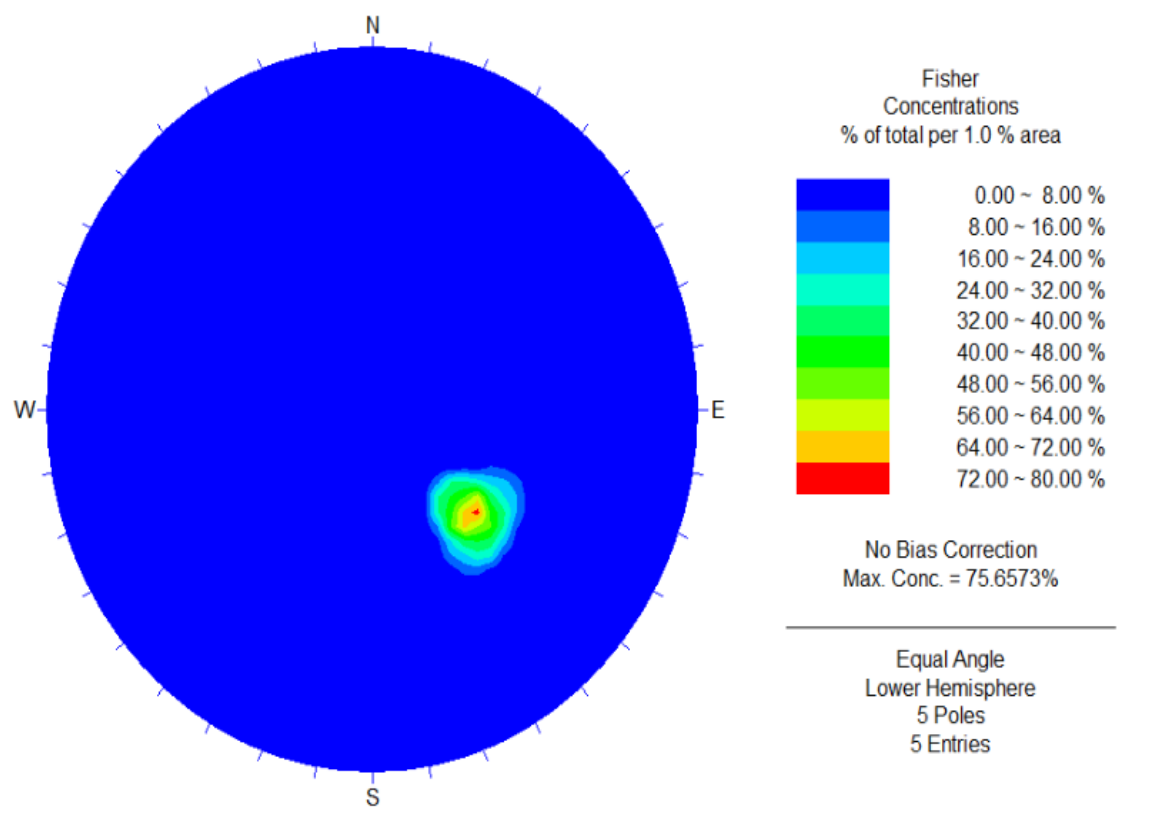
distintas combinaciones que se pudieran dar entre las direcciones. Al ingresar los datos tabulados se generará de forma inmediata, una ilustración, la cual muestra la concentración y ubicación de los polos o zonas que presentan mayor debilidad de acuerdo a las fallas en las estructuras, para así poder realizar una interpretación de carácter técnico.

Los valores necesarios para utilizar el software son los que representan el Dip y Dipdir de las respectivas fallas, en la tabla anterior el Dipdir ya está calculado, pero al ser dificultoso obtener la dirección de inclinación o Dipdir directamente de las discontinuidades geomecánicas se procede a calcularlo a través de un sistema preestablecido como lo demuestra la siguiente tabla (Ver Tabla 1-3):

Tabla 1-3. Calculo del Dipdir

Condicionante	Dip direction
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: Programa Dips Rocscience



Fuente: Software Dip de Rocscience, Elaboración Propia

Figura 1-5. Proyecciones estereográficas de concentración en zonas de mayor debilidad en la mina Pullalli

En la figura anterior (Ver Figura 1-5), es posible apreciar la localización del polo que representa la concentración de la zona de mayor debilidad en la mina, este polo como se puede observar la mayor concentración se da en la zona de color rojo, el cual posee entre un 72% a 80% de concentración total de la zona de debilidad representando la zona crítica, dicha concentración disminuye gradualmente a medida que se aleja de la zona crítica. El sector más vulnerable de discontinuidad, se encuentra en la zona Sureste de la mina y como se puede apreciar en la tabla (Ver tabla 1-2), la tendencia de las fallas mayores tiene un rumbo orientándose hacia el Noreste, con buzamiento de alrededor de 45 ° hacia el Noroeste.

1.5.2. Fallas menores existentes

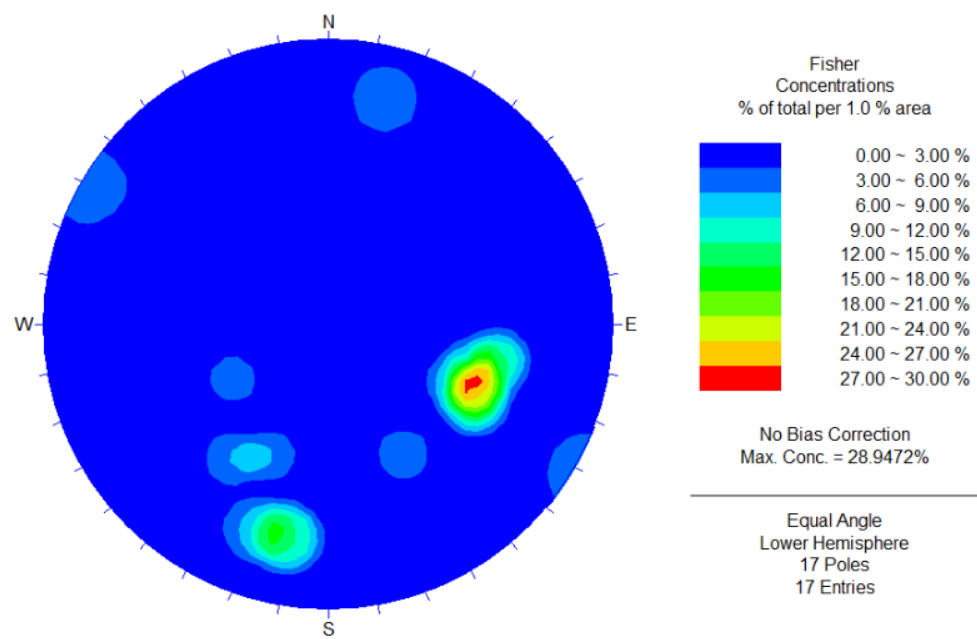
En el caso de fallas intermedias menores a 2 cm de espesor y hasta 10 cm de espesor, se contó con el aporte de los mapeos geológicos realizados por el área de geología de la mina C.M. Pullalli y con la información aportada por levantamiento geotécnico realizado en terreno. A continuación, se muestran la tendencia de las discontinuidades geomecánicas antes mencionadas en la siguiente tabla (Ver Tabla 1-4):

Tabla 1-4. Actitud de fallas menores

FALLAS INTERMEDIAS Y MENORES				
Falla	Rumbo	Manteo	Dip (°)	Dipdir (°)
FI1	N30E	88SE	88	120
FI2	N24E	59NW	59	294
FI3	N30E	58NW	58	300
FI4	N23E	58NW	58	293
FI5	N30W	42NE	42	60
FI6	N66W	53NE	53	24
FI7	N78W	74NE	74	12
FI8	N70W	74NE	74	20
FI9	N80W	74NE	74	10
FI10	N76W	78SW	78	194
FI11	N60E	55NW	55	330
FI12	N14E	63W	63	284
FI13	N10E	62W	62	280
FI14	N54W	60NE	60	36
FI15	N28E	62NW	62	298
FI16	N15E	54W	54	285
FI17	N25E	50W	50	295

Fuente: Programa Dips Rocscience

Estas diecisiete discontinuidades geomecánicas, se representarán mediante proyección estereográfica, utilizando el software DIPS de Rocscience al igual que el capítulo anterior.



Fuente: Software Dip de Rocscience, Elaboración Propia

Figura 1-6. Proyecciones estereográficas de concentraciones en zonas de intermedia debilidad en la mina Pullalli

La ilustración anterior (Ver Figura 1-6) demuestra la localización de los polos que representan las concentraciones de las zonas de fallas intermedias, estos polos como se puede apreciar, la mayor concentración se dan en la zonas de color rojo, el cual posee entre un 27% a 30% de mayor concentración total de la fallas intermedias, influyendo considerablemente de menor manera que las fallas mayores, el sector más vulnerable de las discontinuidades intermedias, se sitúa en el Sureste, considerándose que las fallas de mayor magnitud, también se sitúan al Sureste lo que revalida que la zona Sureste de la mina es el punto más vulnerable, también la mayoría de las fallas intermedias se encuentran en la zona Sur, tanto orientados al sector Este como al Oeste y como se puede interpretar en la tabla de las actitudes de las fallas intermedias, presentan dos tendencias en sus actitudes, una similar al modelo de fallas mayores con rumbo orientado hacia el Noreste con manteo de 58° hacia el Oeste y otro casi perpendicular con rumbo hacia el Noroeste, con buzamiento de alrededor de 74° hacia el Norte.

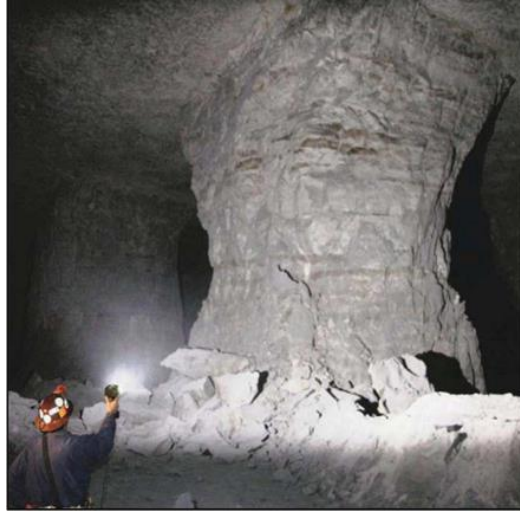
Por lo tanto, podemos concluir que el modelo estructural, basado en la orientación de las fallas principales y menores, tiene una tendencia bien definida hacia el NE, con manteos medios hacia el NW principalmente. De manera perpendicular (orientación NW y manteos hacia el SW) a esta tendencia principal se sitúa una tendencia secundaria de orden menor.

1.6. SELECCIÓN DE LA ZONA MÁS VULNERABLE PARA FACTIBILIDAD DE FORTIFICACION

Según lo anteriormente analizado es evidente que en la zona Sureste de la mina Pullalli, se encuentra la zona más crítica en cuanto a fallas geológicas presentes en el yacimiento, ya que la mayoría de las fallas se concentran en esa zona, observando la figura 1-1 ubicación de los caserones principales en explotación, la ubicación del Caserón Silvana se sitúa en la zona Sureste coincidiendo con la zona más crítica en cuanto a debilidad en el plano por una discontinuidad. Este caserón se ubica en los últimos niveles de la mina, lo que lo hace más vulnerable aun debido a las fuerzas que convergen hacia él espacio vacío que se genera al sacar una cantidad de volumen de masa rocosa, teniendo que soportar estas fuerzas lo que conlleva a priorizar esta zona de producción, para comprobar si es necesario realizar una fortificación.

1.6.1. Caserón Silvana

Este caserón tiene una aproximadamente ley 0,12% y se estima que tiene una producción de 90000 ton de material útil, que le da una vida útil al caserón de aproximadamente 6 a 7 meses debido a que la planta procesa 20 ton/día. Para poder estudiar este caserón se tomaron muestras de los pilares principales que este posee, analizando 4 pilares fundamentales del Caserón Silvana (Ver Figura 1-7), pilar principal del caserón, pilar de rampa de acceso al caserón, pilar Este del caserón y pilar de entrada al caserón.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada en terreno

Figura 1-7. Caserón Silvana

1.6.2. Calidad geomecánica del macizo rocoso en el Caserón Silvana

Para estimar la calidad del macizo rocoso de la zona de estudio y tener un parámetro para efectos de diseño de fortificación se basa en sistemas de rating en que se asigna un puntaje a diversas características y se calcula un puntaje final, en este caso se usara para clasificar el macizo rocoso el índice Rock Mass Rating (RMR) propuesto por Bieniawski en 1989, el cual permite caracterizar y estimar la calidad de un macizo rocoso de manera rápida, sencilla y con un bajo costo, varía en un puntaje entre 0 y 100, desde muy mala calidad a muy buen calidad geotécnica, asignando puntaje a los siguientes parámetros:

UCS (Uniaxial Compressive Strength): Resistencia a la compresión uniaxial o la compresión simple, este valor es estimado a partir de golpes de martillo geológico, según escala de durezas de Dee & Jennings & Robertson (1969). Para la obtención de este dato se tomaron 5 muestras de roca en el Caserón Silvana, con la intención de realizar una prueba de carga puntual o Point Load Test (P.L.T.), el ensayo de laboratorio realizado por del departamento de Geología de la C.M Pullalli, lo que resulto ser una roca tipo R5 de dureza entre 100-250 Mpa según la ISRM. Como lo demuestran las siguientes tablas (Ver Tabla 1-5 y 1-6)

Tabla 1-5. Resultados obtenidos mediante ensayo P.L.T.

ID Muestra	MPa	Rango Dureza según ISRM
M1	198.19	R5
M2	134.10	R5
M3	120.93	R5
M4	190.05	R5
M5	176.47	R5

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Tabla 1-6. Valores máximo, mínimo y promedio

Promedio (MPa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
163.95	120.93	198.19

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

RQD (Rock Quality Designation): Designación de calidad de roca, en este caso fue estimado según la información aportada por el área de Geología de la C.M Pullalli y consiste en calcular el porcentaje de recuperación de la suma de testigos de más de 10 cm. de largo, respecto a la longitud total del sondaje, este porcentaje tiene una clasificación designada, este índice fue desarrollado en 1964 por D.U. Deere.

Espaciamiento de las discontinuidades: Este valor es el espacio entre una discontinuidad y otra obtenido en terreno, con el apoyo del área de Geología de la C.M Pullalli.

Condición de discontinuidades: Estos valores se estiman en cuanto a la condición de relleno, rugosidad, alteración y apertura de las discontinuidades, a partir de lo observado en terreno con el apoyo de área de Geología de la C.M Pullalli

Flujo de agua: Este valor se estima a condiciones generales, en cuanto a la presencia de humedad en el macizo rocoso, a partir de lo observado en terreno con el apoyo de área de Geología de la C.M Pullalli

Todos estos parámetros adquieren un puntaje y se suman de tal manera, que pueda entrar a una clasificación según Bieniawski, como lo demuestra la siguiente tabla de parámetros del Rock Mass Rating, (Ver Tabla 1-7).

Tabla 1-7. Puntaje de parámetros del RMR

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: Excavaciones subterráneas en roca Bieniawski, 1979

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Clasificación de RMR (oscila entre 0 y 100):

Clase	Calidad de roca	RMR
I	muy buena	81 – 100
II	buena	61 – 80
III	regular	41 – 60
IV	mala	21 – 40
V	muy mala	0 - 20

Fuente: Excavaciones subterráneas en roca Bieniawski, 1979

Figura 1-8. Clasificación del macizo rocoso según Bieniawski

Al comprender el RMR, se procederá a evaluar el macizo rocoso geomecánicamente en los 4 pilares fundamentales del Caserón Silvana, pilar principal del caserón, pilar de rampa de acceso al caserón, pilar Este del caserón y pilar de entrada al caserón. (Ver Tabla 1-8, 1-9, 1-10, 1-11.)

1.6.3. RMR Pilar principal del Caserón Silvana

Tabla 1-8. RMR Pilar Principal Cas. Silvana

Parámetro	Clasificación	Puntuación
UCS (Mpa)	100-250	12
RQD (%)	72.5	13
Espaciamiento (mm)	267	10
Persistencia (m)	>20	0
Apertura (mm)	>5.0	0
Rugosidad	Rugoso	5
Relleno (mm)	Relleno Duro >5	2
Alteración	Ligeramente Alterada	5
Condición de Agua	Goteos	4
RMR (B)		51
Calidad de la roca	Regular	51

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Como se mencionó anteriormente los parámetros del R.M.R. se estimaron en terreno con el apoyo del área de Geología de la C.M. Pullalli, obteniendo un puntaje total de 51 en el rating, clasificándose como una roca de calidad regular el macizo rocoso, (Ver Figura 1-8, 1-9), según Bieniawski.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada en terreno

Figura 1-9. Pilar principal cas. Silvana

1.6.4. RMR Pilar rampa de acceso Caserón Silvana

Tabla 1-9. RMR Pilar rampa de acceso

Parámetro	Clasificación	Puntuación
UCS (Mpa)	100-250	12
RQD (%)	70	13
Espaciamiento (mm)	286	10
Persistencia (m)	>20	0
Apertura (mm)	>5.0	0
Rugosidad	Muy Rugoso	6
Relleno (mm)	Relleno Duro >5	2
Alteración	Ligeramente Alterada	5
Condición de Agua	Ligeramente Húmedo	10
RMR (B)		58
Calidad de la roca	Regular	58

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Como se mencionó anteriormente los parámetros del R.M.R. se estimaron en terreno con el apoyo del área de Geología de la C.M. Pullalli, obteniendo un puntaje total de 58 en el rating, clasificándose como una roca de calidad regular según Bieniawski. (Ver Figura 1-8, 1-10)



Fuente: Elaboración Propia, fotografía tomada en terreno

Figura 1-10. Pilar de rampa de acceso

1.6.5. RMR Pilar Entrada a Caserón Silvana

Tabla 1-10. RMR Pilar de entrada

Parámetro	Clasificación	Puntuación
UCS (Mpa)	100-250	12
RQD (%)	70	13
Espaciamiento (mm)	188	8
Persistencia (m)	3-10	2
Apertura (mm)	1-5	1
Rugosidad	Muy Rugoso	6
Relleno (mm)	Relleno Duro >5	2
Alteración	Moderadamente Alterada	3
Condición de Agua	Humedad	7
RMR (B)		54
Calidad de la roca	Regular	54

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Como se mencionó anteriormente los parámetros del R.M.R. se estimaron en terreno con el apoyo del área de Geología de la C.M. Pullalli, obteniendo un puntaje total de 54 en el rating, clasificándose como una roca de calidad regular según Bieniawski. (Ver Figura 1-8, 1-11)



Fuente: Elaboración Propia, fotografía tomada en terreno

Figura 1-11. Pilar de entrada

1.6.6. RMR Pilar Este del Caserón Silvana

Tabla 1-11. RMR Pilar Este

Parámetro	Clasificación	Puntuación
UCS (Mpa)	100-250	12
RQD (%)	72.5	13
Espaciamiento (mm)	59	5
Persistencia (m)	1-3	4
Apertura (mm)	0.1-1.0	3
Rugosidad	Muy Rugoso	6
Relleno (mm)	Relleno Duro <5	4
Alteración	Moderadamente Alterada	3
Condición de Agua	Humedad	7
RMR (B)		57
Calidad de la roca	Regular	57

Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Como se mencionó anteriormente los parámetros del R.M.R. se estimaron en terreno con el apoyo del área de Geología de la C.M. Pullalli, obteniendo un puntaje total de 57 en el rating, clasificándose como una roca de calidad regular según Bieniawski. (Ver Figura 1-8, 1-12)



Fuente: Elaboración Propia, Datos proporcionado por el área de geología

Figura 1-12. Pilar Este

1.6.7. Análisis de RMR Caserón Silvana

Analizando los pilares principales del correspondiente caserón, el R.M.R. del Cas. Silvana promediando los 4 R.M.R. de cada pilar analizado, es de 55 en el rating, ubicando en general al macizo rocoso del caserón como regular (Ver Figura 1-8), presentando en la mayoría de sus pilares una humedad relativa que en algunos casos se condicionaba a goteos, como también en su mayoría predominaban la zona sin humedad en el techo del caserón, lo que da indicio de que la roca necesita algún soporte o procedimiento que proporcione mayor estabilidad al macizo rocoso para dar más seguridad a la labor y no tener accidentes fatales o incapacitantes que influyan en el desarrollo de la producción. Al no clasificarse con una calidad de roca buena, esta puede ceder en cualquier momento un desprendimiento de roca debido a que este caserón se sitúa en los últimos niveles de la mina soportando las fuerzas que convergen hacia el espacio vacío provocado por la extracción de un volumen de masa rocosa.

Es por esto que es necesario comprender e identificar los diferentes métodos de fortificación para conocer los distintos elementos que ayudan a cumplir una función muy específica en la labor, como lo es permitir que la labor sea estable cuando esta no tenga una condición de auto soportable. Analizar sus ventajas y desventajas generales y su comportamiento en las diferentes condiciones, como también su resistencia en toneladas que aporten al sostenimiento.

**CAPÍTULO 2: ANALIZAR LOS DISTINTOS MÉTODOS DE
FORTIFICACIÓN A TRAVÉS DE UNA COMPARACIÓN DE SUS
CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS.**

2. ANALIZAR LOS DISTINTOS MÉTODOS DE FORTIFICACIÓN A TRAVÉS DE UNA COMPARACIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS.

El presente capítulo trata del estudio de los diferentes procedimientos de fortificación, desde los puntos de vista de resistencia mecánica, como base para comprobar la estabilidad de cada método en una excavación subterránea en función de su tipología y el comportamiento mecánico de cada uno con el fin de comparar sus características más significativas.

Uno de los riesgos más importantes de accidentes en las labores mineras subterráneas, es la caída de rocas desde el techo de las galerías, de sus cajas o costados, situación a la que están expuestos todos los trabajadores de la mina. Al construir labores subterráneas, se extrae un volumen de masa rocosa que provoca cambios en las condiciones naturales de equilibrio. Se crean espacios en los cuales las caras libres quedan sometidas a fuerzas que quedan sin oposición y se dirigen hacia el espacio vacío, provocando grietas en el techo y las cajas, los cuales pueden generar el desprendimiento de rocas sueltas o planchones. Este riesgo se enfrenta y contrarresta con fortificación y/o acañadura, la fortificación controla el riesgo en gran medida, pero aun así debe realizarse acañadura periódicamente, para mantener las paredes y techo bajo control.

2.1. ¿POR QUÉ SE DEBE FORTIFICAR Y ACUÑAR?

El Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N°132, Capítulo Sexto “Fortificación” artículo 157) indica que:

“Los trabajos subterráneos deben ser provistos, sin retardo, del sostenimiento más adecuado a la naturaleza del terreno y solamente podrán quedar sin fortificación los sectores en los cuales las mediciones, los ensayos, su análisis y la experiencia en sectores de comportamiento conocido, hayan demostrado su condición de auto soporte consecuente con la presencia de presiones que se mantienen por debajo de los límites críticos que la roca natural es capaz de soportar.”

El Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N°132, Capítulo Sexto “Fortificación” artículo 158) indica que:

“Toda galería que no esté fortificada, debe ser inspeccionada periódicamente a objeto de evaluar sus condiciones de estabilidad y requerimientos de “acuinadura”, debiendo realizarse de inmediato las medidas correctivas ante cualquier anomalía detectada. En aquellas galerías fortificadas, deberá inspeccionarse el estado de la fortificación con el fin de tomar las medidas adecuadas cuando se encuentren anomalías en dicha fortificación”

2.2. CAÍDAS DE ROCAS

El desprendimiento de rocas (Ver Figura 2-1), puede verse favorecido por las siguientes condiciones inadecuadas:

- Características y condiciones determinadas de la masa rocosa.
- Forma y dimensiones de la excavación.
- Método empleado de explotación.
- Debilitamiento producido por las tronaduras.
- Presencia de agua.



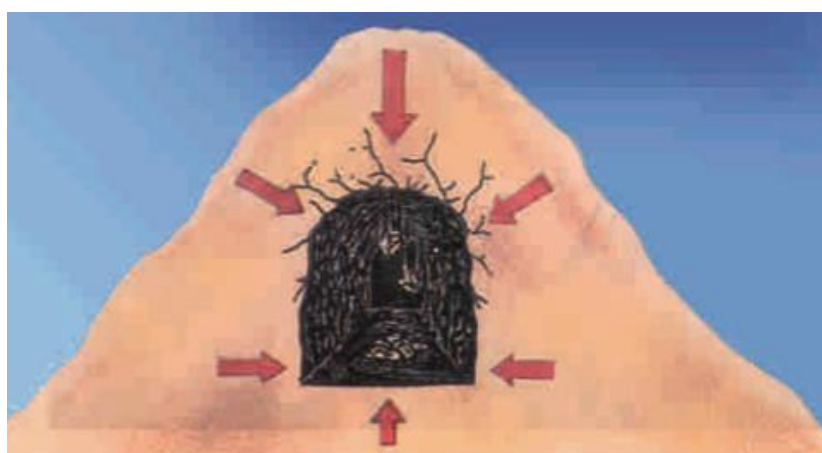
Fuente: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acuinadura\(RaulGonzalezSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acuinadura(RaulGonzalezSernageomin).pdf)

Figura 2-1. Accidente por caída de rocas

La estabilidad del cerro se ve interrumpida, al extraer un volumen de masa rocosa, al quedar un espacio vacío, las caras libres se ven expuestas a fuerzas que ahora no poseen oposición y convergen al mismo espacio, provocando grietas en las caras, especialmente en las cajas y en el techo generando caída de rocas y zonas de debilidad, las que posteriormente se desprenderán.

En cuanto a la caída de rocas, hay otros factores que influyen como la dimisión de la excavación y el método de explotación, ya que, para poder realizar la manera de explotación, es esencial la realización de grandes cantidades de labores, debido a esto se genera un mayor volumen de caras libres y espacios vacíos en el yacimiento.

Por otra parte, las características de la masa rocosa, como la dureza, elasticidad, fallas mayores, fallas menores y diaclasas, facilitan la formación de grietas y el desprendimiento de planchones. Existen otros factores adicionalmente ya mencionados anteriormente que ayudan al debilitamiento del macizo rocoso como, por ejemplo: la presencia de agua, la temperatura, la presión, humedad, añadiéndose también el debilitamiento propio provocado por la voladura específicamente en el uso de explosivos. (Ver figura 2-2)



Fuente: AcuñaManual. ACHS

Figura 2-2. Fuerzas que convergen hacia el vacío de un caserón

2.3. ACUÑADURA

Además de las condiciones inadecuadas del macizo rocoso, la caída de rocas se produce por:

- No acuña

- Acuñar en forma deficiente
- Falta de fortificación
- Uso inadecuado de las herramientas

La acuñadura es la operación de desprender oportunamente planchones o material rocoso suelto susceptible de caer desde las cajas y/o techos, evitando que caigan imprevistamente y provoquen lesiones y daños, cuyo objetivo es verificar, detectar y hacer caer de manera controlada estas rocas y/o planchones que se encuentren desprendidos y/o ligeramente desprendidos impidiendo que caigan de forma imprevista. La Acuñadura es una labor de carácter obligatorio el cual debe efectuarse de manera planificada, sistemática, controlada y debe realizarse las veces que sea necesario. Además, se puede efectuar de manera manual o mecanizada.

Toda labor que no posea ningún tipo de fortificación debe ser chequeada periódicamente con la finalidad de evaluar sus condiciones de estabilidad, y requerimientos de acuñadura, realizándose cualquier labor correctiva de forma inmediata ante cualquier anomalía que presente la labor.

En minería, la acuñadura genera entre el 30% y 40% de los accidentes de trabajo, y en la mayoría de los casos son gravemente incapacitantes o fatales. Es por esto, que debe realizarse por personal responsable y experimentado, con amplios conocimientos de los riesgos, los métodos de control, las normas y las técnicas de esta actividad.

Al acuñar un determinado sector, se debe prohibir el paso de personas o vehículos hasta que el sector se encuentre seguro, colocando barreras o letreros avisando de esta medida. Se debe verificar en la zona de acuñadura la existencia de instalaciones eléctricas o cañerías de aire comprimido o agua, las que deberán protegerse por la eventual caídas de planchones sobre ellas.

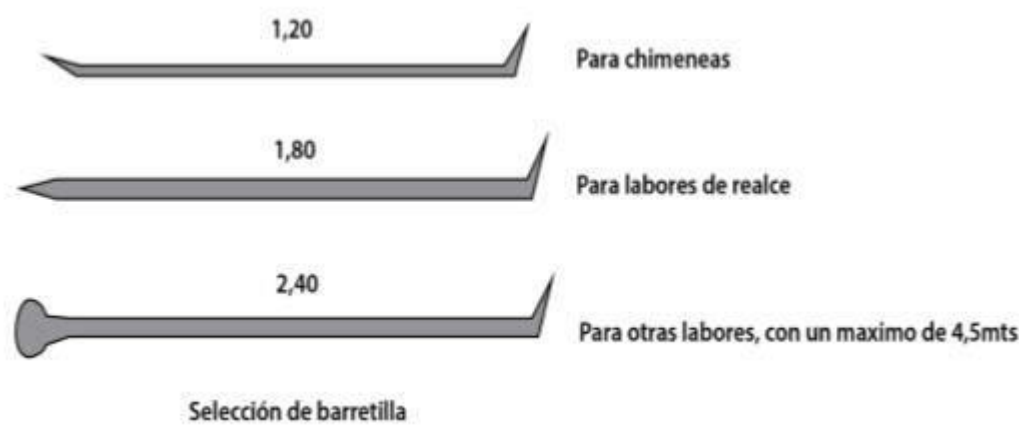
La secuencia para revisión y acuñadura en galerías debe comenzar en el techo y continuar en las cajas, en ambos casos desde atrás hacia la frente de trabajo, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Fractura del terreno
- Planos de falla
- Rocas sospechosas
- Debe realizarse con la iluminación adecuada
- Los acuñadores deben tener un rango adecuado a la sección

2.3.1. Herramientas para acuñar manualmente

Para realizar tareas de acuñadura se utiliza una herramienta llamada barretilla de seguridad o acuñador, esta debe ser capaz de soportar los fuertes golpes a los cuales se ve expuesta a realizar en contacto frente la roca, el tamaño del acuñador está asociado a la labor de eliminación de rocas y/o planchones que se realizara, sus dimensiones varían entre 1,2 m como mínimo y un máximo de 4,5 m.

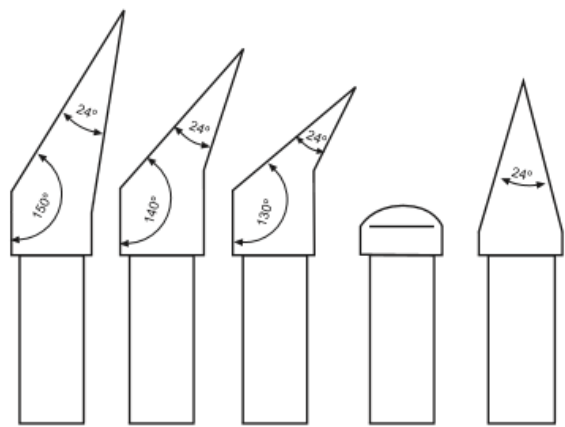
Los acuñadores de 1,2 m son utilizados generalmente para trabajos realizados en chimeneas, mientras que existen barretillas especiales destinadas a labores de realce con un tamaño de 1,8 metros y por último hay acuñadores de 2,4 metros utilizados para otras labores o acuñaduras, alcanzando como máximo de 4,5 metros. (Ver figura 2-3)



Fuente: Guía N°5 de operación de la pequeña minería perforación y acuñadura

Figura 2-3. Tipo de barretilla

En sus extremos el acuñador posee un elemento en punta o bola que es útil para detectar planchones. En el lado opuesto la barretilla debe tener forma de paleta para así poder realizar palanca y desprender el material suelto. Cabe mencionar que en la faena debe haber una cantidad suficientes de acuñadores según los requerimientos de cada mina y en perfectas condiciones para su buen uso. (Ver figura 2-4)



Fuente: <http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/acunadura-manual.pdf>

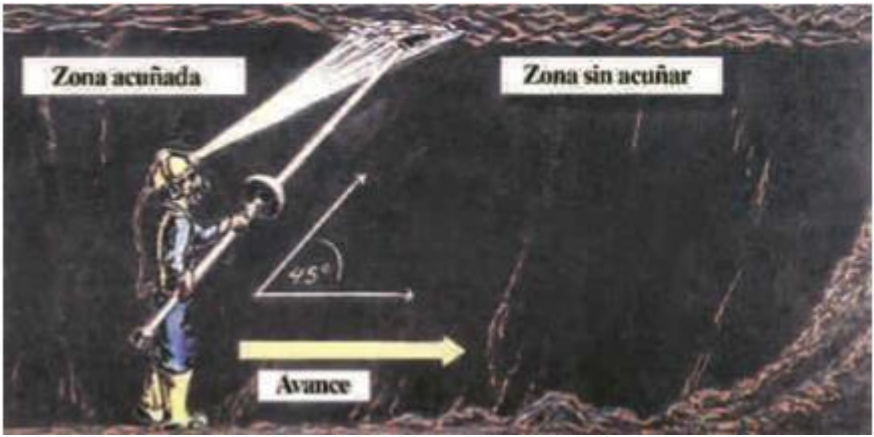
Figura 2-4. Tipos de punta barretillas

2.3.2. Dirección de avance al acuña

La acunadura se comienza desde la zona segura, realizando esta tarea en avance, para así quedar ubicado siempre bajo lugares acunados, aproximándose a la frente del avance de manera segura. Una de las causas que produce caída de rocas y por consiguiente accidentes y daños es el realizar acunadura en los sectores cercanos a la frente del avance ignorando los tramos anteriores. Se hace esencial respetar y realizar siempre la acunadura como se mencionó.

2.3.3. Posición para acuña

Hay que ubicarse en la zona más lejana posible del punto en el que caerá el planchón, por lo que es necesario contar con un acunador lo suficientemente largo. El correcto uso de la barretilla de seguridad, se basa en usar este elemento al costado el cuerpo y no manejarlo a más de 45° grados con respecto de la horizontal, tanto al golpear el techo o las cajas como al realizar palanqueo a rocas sueltas. Esta postura inclinada mantendrá alejado al trabajador del punto de caída del planchón. (Ver figura 2-5)



Fuente: Acunadura manual. ACHS

Figura 2-5. Dirección de avance y posición para acunar

2.3.4. Postulado de acunadura

Siempre debe acunarse, antes, durante y después de cada operación minera.



Fuente: <http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/acunadura-manual.pdf>

Figura 2-6. Acunadura Manual

2.4. FORTIFICACIÓN

Con el objetivo de proteger a los trabajadores y evitar derrumbes en faenas subterráneas, la industria ha implementado en la construcción de túneles el proceso de fortificación, que básicamente consiste en un conjunto de procedimientos para recubrir o

reforzar el entorno de una labor subterránea, mediante algún elemento de sustento cuando su condición no es auto soportable.

La fortificación en labores mineras, es una actividad que constituye una importante contribución a la seguridad en labores subterráneas, por lo tanto, los encargados de esta importante labor tienen una gran responsabilidad y deben estar seguros que su trabajo esté bien hecho.

El rol fundamental de la fortificación es:

- Mantener las labores seguras y con una sección y dimensiones suficientes para la circulación del personal, equipos, aire, etc.
- Impedir el desmoronamiento de material fracturado.
- Disminuir el movimiento de las cajas, techo y piso (minería del carbón).
- Mantener la cohesión de los terrenos.

La fortificación debe diseñarse de manera racional y específica para cada caso en particular. En faenas mineras de corta vida, la fortificación si es necesario, será tan sencilla como sea posible; no obstante, debe asegurar la estabilidad de la labor. En faenas de mayor duración, la tendencia es diseñar fortificaciones de carácter más permanente.

2.5. CLASIFICACIÓN DE LA FORTIFICACIÓN

2.5.1. Fortificación activa

Son aquellas piezas o métodos de soporte que ejercen la acción de sostener o sujetar desde el mismo momento en que son instalados, mediante el empleo de una carga externa sobre el macizo rocoso. También se conocen como activos aquellos sistemas que alteran el interior del macizo, entre ellos: pernos con anclajes expansivos, pernos tensados, Split set y otros. (Ver figura 2-7)



Fuente: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura\(RaulGonzalezSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura(RaulGonzalezSernageomin).pdf)

Figura 2-7. Pernos de fricción Split-Set

2.5.2. Fortificación pasiva

Es aquella en que, por motivos de seguridad y operacionales, o emplea ninguna carga externa al momento de realizar la instalación, esta fortificación trabaja solo si el macizo rocoso experimenta alguna deformación. También se definen como pasivos los sistemas que modifican el exterior de la excavación, entre ellos: soporte con madera, marcos metálicos, mallas, shotcrete, etc.



Fuente: http://www.construccionminera.cl/excavaciones-subterraneas-tecnologia-para-todo-el-ciclo/#.Wtj_xPlubIU

Figura 2-8. Fortificación con malla de alta resistencia

2.5.3. Fortificación combinada

Se clasifican como una combinación entre fortificación activa y fortificación pasiva, es empleada para garantizar la estabilidad de las labores y se instalan de modo posterior a los tiros de avance. (Ver figura 2-9)



Fuente: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura\(RaulGonzalezSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura(RaulGonzalezSernageomin).pdf)

Figura 2-9. Sistema de shotcrete con malla y perno

2.6. TIPOS DE FORTIFICACIÓN

2.6.1. Fortificación con madera

La madera es uno de los sistemas de fortificación más utilizado a nivel de pequeña minería y también en la minería subterránea del carbón, por la facilidad de manejo, colocación y su bajo costo. Puede recibir fuertes presiones sin quebrarse de forma inesperada y brusca debido a su gran elasticidad; lo que dará aviso anticipado en caso que sea necesario reemplazarla o reforzarla.

Se deben considerar ciertos factores fundamentales al momento de elegir correctamente la madera a utilizar; como verificar las condiciones ambientales en la que se utilizará la madera, estas pueden corresponder a un ambiente húmedo o uno seco, de igual forma influye en la variación de peso, propiedades mecánicas y durabilidad.

intensamente fracturada y/o muy débil que le confieren calidad mala a muy mala, sometida a condiciones de altos esfuerzos.

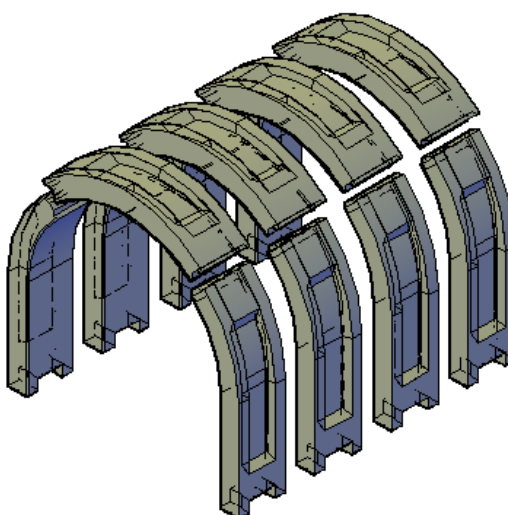
Los marcos metálicos son utilizados para obtener un control efectivo de la estabilidad en defectuosas condiciones de terreno, debido a su excelente resistencia mecánica y sus propiedades de deformación, lo cual contrarresta el cierre de la excavación y evita su ruptura prematura.

Este sistema tiene como ventaja que continúa proporcionando soporte después que hayan ocurrido deformaciones importantes.

Los marcos son construidos con perfiles de acero, según los requerimientos de la forma de la sección de la excavación, es decir, en forma de baúl, herradura o incluso circulares, siendo recomendable que éstos sean de alma llena.

Tipos de marcos de acero:

Rígidos: Conformados por dos o tres segmentos que son unidos por platinas y pernos con tuerca. No se emplea en zonas de sobre presión, ya que puede colapsar al ser sobrepasada su resistencia. (Ver figura 2-11).



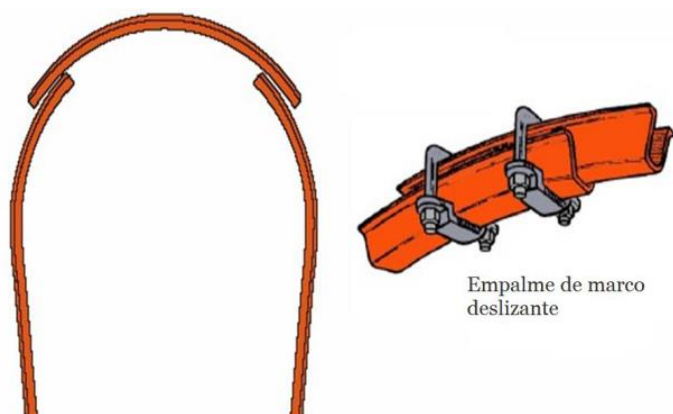
Fuente: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura\(RaulGonzalezSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura(RaulGonzalezSernageomin).pdf)

Figura 2-11. Marcos metálicos rígidos

Cedentes o deslizantes: Conformados usualmente por tres segmentos que se deslizan entre sí, sujetos y ajustados con uniones de tornillo. (ver figura 2-12)

- Cede cuando el empuje de la roca sobrepasa un cierto valor.
- Se emplea en terrenos sometidos a grandes esfuerzos.

- Debe asegurarse los deslizamientos de los segmentos del marco.



Fuente: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura\(RaulGonzalezSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Fortificacion-y-acunadura(RaulGonzalezSernageomin).pdf)

Figura 2-12. Marcos metálicos deslizantes

- Ventajas:
 1. Soporta altas deformaciones.
 2. Alta resistencia a ambiente agresivo.
 3. Material homogéneo con características uniformes en toda la estructura.
 4. Incombustible.
- Desventajas:
 1. Disminuye el espacio útil de la galería.
 2. Difícil adaptación a las irregularidades de la labor minera.
 3. Limitación en galerías de grandes dimensiones de sección.

2.6.3. Fortificación con mallas de acero

Las mallas se instalan pegadas a las paredes de la labor, siendo afirmada con pernos de anclaje o con lechada (dependiendo de la durabilidad) y afianzada a la superficie de la roca con planchuelas y tuercas. Están fabricadas por alambre de acero especial de alta resistencia, en diferentes grosores, lo que permite usar una mayor distancia entre los anclajes.

Se utilizan especialmente en zonas comprometidas por estallidos de rocas, o donde el macizo rocoso está muy alterado y/o fragmentado. Este método de fortificación

se recomienda cuando se quiere garantizar la seguridad de obras subterráneas sometidas a los esfuerzos mencionados anteriormente.

En minería se utilizan dos tipos de mallas:

Malla trenzada: Su alta flexibilidad y capacidad de absorber importantes cantidades de energía, dependiendo de su instalación, son la principal característica de esta. En la retención de bloques pequeños inestables, provocado por activaciones estructurales, movimientos sísmicos y otros, resulta ser muy eficaz. Su uso con shotcrete es inapropiado, debido al considerable rebote. (Ver figura 2-13)



Fuente: <http://www.starrymesh.es/mine-screen-mesh.html>

Figura 2-13. Malla trenzada

Malla soldada: Se caracterizan por tener medidas y pesos conocidos, tienen terminaciones de alta calidad y uniones más sólidas. Las uniones al ser soldadas no se corren, por lo tanto, las secciones de acero se mantienen sin variación. Son fáciles y rápidas de instalar, ya que se trata de elementos pre fabricados, por lo que se ahorra tiempo y dinero. Su principal ventaja es la posibilidad de colocar shotcrete en una etapa posterior. (Ver figura 2-14)



Fuente: <https://prodac.bekaert.com/es-MX/infraestructura/refuerzo-de-concreto/malla-electrosoldada>

Figura 2-14. Malla soldada

2.6.4. Fortificación con Shotcrete

Es utilizado principalmente en la construcción de túneles para formar tanto el revestimiento temporal como permanente, el shotcrete u hormigón proyectado ha sido adoptado por la minería subterránea como un medio esencial de soporte de rocas.

Shotcrete se descompone de Shot (disparar) y crete (concreto), palabra extraída del idioma inglés que se refiere al acto de proyectar hormigón sobre una superficie determinada. Sus componentes son áridos, cemento y agua, y se puede complementar con materiales finos, aditivos químicos y fibras de refuerzo.

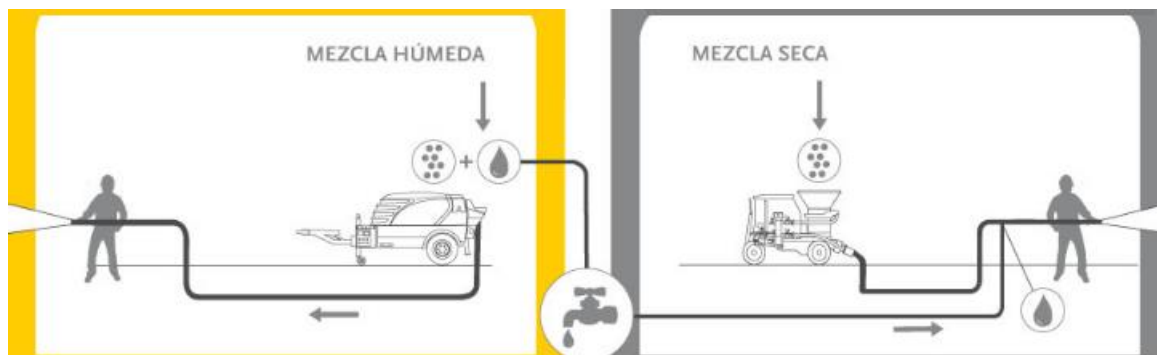
La mezcla utilizada para este tipo de hormigón se consolida por la fuerza del impacto y es relativamente seca, por lo que se desarrolla una fuerza de compresión similar al hormigón de alta resistencia o al hormigón normal, dependiendo de la dosificación usada.

Algunas características importantes del shotcrete, son la resistencia temprana en su estado fresco (sobre todo para el soporte de excavaciones subterráneas), la consistencia adecuada y la resistencia a la compresión y durabilidad en su estado endurecido.

El shotcrete se puede realizar manualmente o con equipos robotizados, por el método de vía seca o vía húmeda. El método más adecuado depende tanto de las dimensiones de la obra y la cantidad de hormigón a proyectar, como de las circunstancias logísticas. (Ver figuras 2-16 y 2-17)

Shotcrete por vía húmeda: El hormigón ya mezclado con agua se transporta por la tubería hasta la boquilla, donde se mezcla con el aire comprimido y el acelerador para proyectarse sobre el sustrato.

Shotcrete por vía seca: La mezcla seca se transporta mediante aire comprimido hasta la boquilla, donde se mezcla con agua y el acelerador para ser proyectado sobre el sustrato.



Fuente: <http://bestsupportunderground.com/que-es-el-shotcrete/>

Figura 2-15. Proyección manual por vía húmeda y seca respectivamente

La resistencia final del shotcrete se obtiene generalmente a los 28 días y el nivel de resistencia se basa principalmente en los requerimientos de diseño, este se comporta como una especie de piel delgada con una gran capacidad de soporte de carga, por lo tanto, deberá tener cierta ductilidad, la que se obtiene con el uso de fibra metálica o sintética, dándole al refuerzo una mayor flexibilidad.

Fibras metálicas: Son cintas discontinuas con dimensiones reducidas, de un tipo de acero con propiedades particulares. El armado disperso del hormigón con fibras metálicas mejora considerablemente las propiedades mecánicas del mismo. Aumentan significativamente la tensión y flexión del shotcrete como herramienta de fortificación, tienen una gran resistencia al fuego y mejoran la adherencia del shotcrete con la roca.

Fibras sintéticas: Son fabricadas a partir de materiales sintéticos que pueden resistir la alcalinidad del hormigón y las condiciones adversas del ambiente. No sufren procesos de oxidación, son estables químicamente frente a todos los ataques y garantizan la durabilidad del hormigón de manera más efectiva que la fibra metálica, que tiene una baja resistencia a la corrosión cuando está expuesta a ambientes agresivos.

La adición de la fibra sintética como metálica, mejora la resistencia de flexura del shotcrete, aumenta la durabilidad, la dureza y reduce la formación de fisuras por retracción.

El comportamiento del shotcrete frente a la absorción de energía, mejora notablemente gracias a la ductilidad que le otorgan las fibras en dosis adecuadas, llegando a aumentar hasta 5 veces la energía de rotura del hormigón respecto al shotcrete sin esfuerzo.

2.6.5. Fortificación con pernos

La fortificación con pernos se basa principalmente en oponerse a la deformación del macizo rocoso, ayudándolo a auto soportarse. El perno pasa a formar parte del mismo entorno, fortaleciendo la resistencia de la roca.

Los tipos de pernos más utilizados en el sostenimiento de terrenos son: pernos estabilizadores de fricción, pernos con anclajes expansivos, pernos cementados con resina o cemento y los cables de acero.

- Ventajas:
 1. La instalación puede ser manual o mecanizada.
 2. Simple de transportar e instalar.
 3. Relativamente económico.
 4. Puede ser usado bajo cualquier geometría de la galería.
 5. Insensible a los efectos de proyección de tronaduras.

2.7. TIPOS DE PERNOS DE FORTIFICACIÓN

2.7.1. Pernos con anclajes expansivos

El perno de anclaje con cabeza de expansión es el más común de este tipo de anclaje mecánico. Controla el movimiento o el desplazamiento de la masa rocosa induciendo la presión de la tensión de la barra entre el anclaje y la platina de apoyo.

Este tipo de soporte produce una tensión de aproximadamente 3,5 toneladas y tiene una resistencia en tracción máxima de 12,5 toneladas.

Se utiliza tanto en las actividades mineras con rocas medianamente duras a duras, masivas, con bloques o estratificada, sin presencia de agua. No es recomendable su uso en rocas muy duras, fracturadas y débiles, debido a que el anclaje podría deslizarse bajo la acción de las cargas. Se puede rellenar con cemento en los lugares en que la labor durará por mucho tiempo.

- Ventajas:
 1. Se puede tensar (roca resistente).
 2. Soporte inmediato.
 3. Relativamente barato.
- Desventajas:
 1. Sólo uso temporal.
 2. Debe ser monitoreado para tensar correctamente.

3. Uso limitado a macizos competentes.
4. Su capacidad de soporte es afectada por vibraciones de tronadura.

2.7.2. Pernos de fricción (Split Set y Swellex)

Están constituidos por un trozo de tubo de acero más ancho que el diámetro de la perforación y que es dividido a lo largo por el centro. La fricción ejercida por los costados del perno lo mantiene en su lugar creando fuerzas que se extienden radicalmente. Este proceso provee la fuerza de fricción que actúa previniendo el movimiento o separación del terreno. Solo el Split set es realmente de fricción. En el caso del Swellex, combina la fricción sumada al mecanismo de expansión del perno.

Se utilizan generalmente en roca severamente agrietada o fracturada sujeta a condiciones de baja tensión.

- Ventajas:
 1. Instalación rápida y simple.
 2. Capacidad de soporte inmediata.
 3. Fácil instalación de malla.
 4. No necesita más que un jackleg o jumbo.
- Desventajas:
 1. Relativamente caro.
 2. Si se usa en instalaciones permanentes, se necesita protección contra la corrosión.
 3. La instalación exitosa de pernos largos es difícil de lograr.
 4. Sólo soporte temporal.

2.7.3. Pernos cemento/resina

Este método de fortificación consiste en un barrote de acero o fierro, con un extremo biselado, el cual es confinado dentro del taladro por medio de cemento (en cartuchos o inyectados), resina (en cartuchos) o una combinación de ellos. En presencia de agua, particularmente en agua ácida, el agente cementante recomendado será la resina, en condiciones de ausencia de agua será el cemento.

La unión resina o lechada con la roca depende de las irregularidades encontradas dentro de la perforación y de la estructura de la roca. Se recomienda para todos tipos de estructuras para el sostenimiento de alta resistencia y a largo plazo.

- Ventajas:
 1. Rápida acción luego de haber sido instalado.

2. Competente y durable.
3. Gran capacidad de soporte en macizos competentes.
4. Si se usa un compuesto de fragüe rápido en el fondo, se pueden tensar.

- Desventajas:

1. No se pueden usar en zonas con aporte de agua.
2. Se pueden tensar sólo siguiendo un procedimiento especial.
3. La calidad de la lechada y el proceso de lechado es difícil de controlar y mantener.
4. La resina tiene una vida limitada y es relativamente más cara.
5. La calidad de la resina puede ser afectada por el ambiente de la mina.
6. El manejo de la resina puede ser desordenado y peligroso, además de generar desperdicios.

2.7.4. Perno helicoidal

El perno helicoidal se utiliza principalmente como soporte permanente para excavaciones subterráneas y está diseñado para ser utilizado en macizos rocoso de mala competencia por lo que es un sistema muy resistente. Se compone de una barra corrugada cuya sección transversal es ovalada, con resaltes en forma de un hilo helicoidal izquierdo, que actúa en colaboración con un sistema de fijación formado por una placa de acero perforada y una tuerca de fundición nodular, las cuales actúan de forma complementaria para reforzar y preservar la resistencia natural del macizo rocoso.

Se utilizan para la fortificación y el reforzamiento de rocas, taludes y suelos. Estas permiten mantener la integridad de la roca sometida a esfuerzos, de manera que actúen de forma eficiente ya sea como arco o viga tendida a través de la excavación.

- Ventajas:

1. Gran capacidad de transferencia de carga en macizos rocos, competencia y durabilidad.
2. Rápida y fácil instalación.
3. La instalación es simple y no requiere de un equipo sofisticado para el ajuste.

Luego de analizar y comparar los distintos métodos de fortificación dentro de una mina subterránea, se puede afirmar que unos son más resistentes que otros y de una vida útil mucho mayor, pueden utilizarse de manera independiente o dependiendo la necesidad del terreno, se puede realizar una combinación de ellos.

Finalmente se llega a la conclusión de que es de vital importancia el sostenimiento dentro de una labor, ya que una mina subterránea sin fortificación podría presentar grandes consecuencias, ya sea para la seguridad del personal como para los equipos. Pero para la selección de éstos se debe tener en cuenta distintos factores, entre ellos la humedad, el método de explotación, el tipo de roca, los campos de esfuerzo, entre otros.

**CAPITULO 3: SELECCIONAR EL METÓDO DE FORTIFICACIÓN MÁS
FACTIBLE PARA EL YACIMIENTO, REFERENTE A LA CALIDAD DEL
MACIZO ROCOSO MEDIANTE ESTUDIOS EMPÍRICOS Y CONOCIMIENTO
ACADÉMICO ADQUIRIDO EN LA UNIVERSIDAD, CON EL FIN DE
MEJORAR LAS OPERACIONES EN LA MINA.**

3. **SELECCIONAR EL MÉTODO DE FORTIFICACIÓN MÁS FACTIBLE PARA EL YACIMIENTO, REFERENTE A LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE ESTUDIOS EMPÍRICOS Y CONOCIMIENTO ACADÉMICO ADQUIRIDO EN LA UNIVERSIDAD, CON EL FIN DE MEJORAR LAS OPERACIONES EN LA MINA.**

En construcciones subterráneas se presentan muchos problemas geoestructurales, es por esto que hay varios factores que inciden en la selección del método de fortificación a ejecutar, el análisis de los diferentes métodos de fortificación ya señalados anteriormente permite diseñar labores estables en el caso de que se seleccionen de manera correcta, pero como sabremos si la elección es la correcta.

El presente capítulo trata de los factores a tener en cuenta para poder seleccionar el método de fortificación más apropiado para la labor y que esta cumpla con las exigencias técnicas, para así evitar accidentes en el tiempo de vida útil del caserón, adecuando un sistema de fortificación que pueda aprovechar la capacidad de autosoporte del macizo empleando la menor fortificación posible, reduciendo así gastos. A su vez se analizará las características técnicas del sistema y la manera de ejecutarlo.

3.1. **FACTORES QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE FORTIFICACIÓN**

Los parámetros a considerar para la elección del método a ejecutar, se pueden agrupar en Geotécnicos-Geomecánicos y Operacionales.

3.1.1. **Parámetros Geotécnicos-Geomecánicos**

Tipo de roca y calidad: El tipo de roca hace hincapié a sus características según su formación, estas pueden clasificarse en rocas ígneas; metamórficas; sedimentarias.

Las rocas de origen ígneas son producto del enfriamiento y solidificación del magma. Esta solidificación se puede originar dentro de la corteza terrestre, formando las rocas ígneas plutónicas o intrusivas, como el granito, gabro, diorita, larvikita, entre otras. Por el contrario, si se enfrían en la superficie entrando en contacto con la atmosfera originan las rocas ígneas volcánicas o extrusivas, como el basalto, dacita, fonolita, entre otros.

Las rocas metamórficas se crean cuando las rocas sedimentarias o ígneas son sometidas a un proceso de transformaciones en estado sólido, mediante un cambio de condiciones de temperatura, presión y humedad o fluidos químicamente activos, así como el granito se transforma en gneis, la caliza en mármol y la lutita en pizarra.

Las rocas sedimentarias se originan por la acción de los agentes atmosféricos sobre rocas preexistentes, a través, de la meteorización ocasionada por agentes físicos, químicos y biológicos o bien por la erosión que la roca queda expuesta, debilitando la roca y provocando su fragmentación, transportando sus sedimentos a otros sitios ya sea por el viento o ríos, entre otros, donde son depositados y transformados como arenisca, lutita, conglomerado, caliza y halita.

En el yacimiento como su geología indica, predominan rocas de origen ígneo como granodiorita, tonalita y andesita, como también en menor grado se encuentran conglomerados cuarcíferos y areniscas gruesas. Estas rocas poseen propiedades físicas con las cuales se puede designar una calidad de la roca en general, mostrado en a la siguiente tabla, (Ver Tabla 3-1):

Tabla 3-1. Clasificación de las rocas y sus propiedades físicas mecánicas

Tipo de Roca		Litología	Peso específico (t/m ³)	Tamaño de granos (mm)	Resistencia a la compresión (Mpa)
Ígneas	Intrusiva	Granodiorita	2,7	2	150-250
		Granito	2,7	0,1-2	200-350
		Monzonito	2,6	1,5	180-300
		Diorita	2,7	0.1-1,5	200-350
		Tonalita	2,85-3,2	2	260-350
		Adamelita	2,6-2,8	1,5-2	50-250
		Gabro	2,8	1-1,5	50-180
	Extrusiva	Andesita	2,7	0,1	300-400
Sedimentarias		Conglomerado	2,6	2	140
		Arenisca	2,5	0,1-1	160-255
		Lutita	2,7	<0,004	70
		Diatomita	2,7	<0,05	90
Metamórficas		Gneis	2,7	2	140-300
		Esquisto	2,7	0,1-1	60-400

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

Además, se deben considerar los siguientes parámetros:

Campo de esfuerzos: Hace referencia a la concentración de las fallas menores y mayores en una zona determinada, donde el campo de esfuerzo de las diferentes fallas puedan designar una zona crítica que necesite atención y refuerzo inmediato en el caso de que las concentraciones de esfuerzos sean excesivas, en el yacimiento aurífero como se señaló anteriormente a través del programa DIP de Rocscience, las fallas mayores y menores tiene una tendencia a concentrarse en la zona Sur Este de la mina, es ahí donde se ubica el caserón Silvana.

Presencia de agua: Este factor es muy importante a la hora de implementar un sistema de fortificación, debido a que la presencia de agua afecta a los elementos de dicho sistema, dando indicio de descartar algunos elementos, como la madera que se pudre o desintegra al ser materia orgánica con la presencia de agua, como los marcos de aceros que se oxidan y pierden ciertas propiedades al contacto con el agua y los pernos con lechada no se pueden usar con la presencia de agua, entre otros.

3.1.2. Parámetros Operacionales

Función de la labor: La finalidad de la labor es un indicio que se debe considerar al momento de emplear un sistema de fortificación, es por esto que según su función se debe calificar la prioridad de la fortificación, es decir, que no se será tan primordial emplear un sistema de soporte para una labor que su función es ventilar, como una chimenea, pero si la labor fuera de producción, acceso de maquinaria, transporte de mineral o personal será prioridad para emplear los elementos de fortificación si este requiere, debido a que se pone en riesgo la vida de trabajadores y la vida útil de equipos.

Geometría: Hace referencia a la dimensión y forma que tiene el caserón a considerar para una propuesta de fortificación, ya que de este modo se puede deducir el área que se abarcará para implementar la fortificación y obtener un diseño a simple vista de la forma que tiene, si este caserón es irregular en su forma, quiere decir que el techo y cajas no es parejo a lo largo de la labor se tendrán que ir adaptando a la forma de ésta mientras se vaya avanzando en el trabajo, requiriendo un tiempo mayor para adaptar a la forma que posee, en cambio sí es relativamente parejo el tiempo que se demorará en implementar la fortificación será menor.

Método de explotación: Es un factor muy importante a la hora de designar un método de fortificación, debido a las características que proporciona, ya que existen métodos de explotación que poseen pilares de autosoporte, así mismo, se aprovechará esta ventaja para no ocupar marcos metálicos o de maderas si este no requiere, o bien

dependiendo de la capacidad y la calidad de la roca sea excelente, no se empleará fortificación, pero tendrá que ser chequeado cada cierto tiempo, para tener un control de este, en cambio un método de explotación que no posea capacidad de autosoporte, requiere de más elementos de fortificación y por lo tanto más gastos al emplear estos marcos de soporte.

Cercanía con otras labores: Esto influye en la cantidad de presión que tiene que soportar, provocadas por las fuerzas que convergen hacia el vacío, que se genera, al extraer un volumen de masa rocosa, que debe soportar el caserón, mientras más cercanía tenga con otras labores, mayor es la presión que se ejerce en los vacíos provocados por la voladura, por lo tanto, se empleará un procedimiento de fortificación que pueda soportar varias toneladas, si bien el caserón se encuentra a una gran distancia entre otra labor, la presión será menor, pero aun así se debe emplear un método de fortificación que pueda soportar una importante cantidad de toneladas.

Temporalidad de la labor: En este caso se debe considerar el tiempo de vida útil en que la labor cumpla su función, ya sea un estimativo o un tiempo exacto, pero sería difícil calcular un tiempo exacto ya que depende de varios factores y premisas que se puedan presentar en el transcurso del tiempo. Si la labor será de ventilación, esta tendrá un tiempo indeterminado, ya que se necesitará para toda la vida útil del caserón a ventilar, si bien no necesita fortificación o en el caso de que lo requiera, esta tendrá un tiempo según la función del caserón, en cambio sí será una rampa de acceso principal, esta se ocupará para toda la vida útil de la mina, priorizando la zona con una fortificación duradera, de largo plazo, para minimizar o anular la mayor cantidad riesgos de caída de rocas que ocasionen accidentes fatales o incapacitantes en el transcurso del tiempo, pero si es un caserón de producción o una rampa de acceso, este tiene una vida útil de un tiempo menor, por lo tanto no será necesario implementar procedimiento de fortificación duraderos, será un gasto demás, es por esto que se empleará un método de fortificación temporal, de corto a mediano plazo, que pueda minimizar o anular en su mayoría las causas de accidentes por caída de rocas, mientras cumpla el tiempo útil la labor.

Considerando todos estos parámetros se puede deducir, descartar y analizar los diferentes métodos de fortificación a implementar, para optar por el más seguro, el que cumpla con todas las exigencias técnicas, y este al alcancé económico dependiendo de la minería en que se clasifique.

3.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE FORTIFICACIÓN BASADO EN LOS FACTORES Y PREPOSICIÓN DE BIENIAWSKI.

Como se mencionó anteriormente existen distintos factores que inciden en una selección de un procedimiento de fortificación, los cuales hay que interpretar y adecuar cada uno a la mina y a el caserón que se implementara la fortificación, que en este caso fue seleccionado debido a la concentración de fallas mayores y menores, concentradas en su mayoría en la zona Sur Este del yacimiento aurífero, donde se ubica el Caserón Silvana, este caserón se clasificó en un sistema de rating denominado Rock Mass Rating mencionado en el primer capítulo, este mismo método complementa la selección de una fortificación mediante una preposición según su clasificación, demostrado en al siguiente tabla, (Ver Tabla 3-2)

Tabla 3-2. Preposición de Bieniawski, Rock Mass Rating

Tipo y Tasa de Roca	Tipo de fortificación		
	Pernos lechados, 20 mm diámetro	Shotcrete	Marco de acero
Muy buena (81-100)	No necesita fortificación, salvo apernado puntual		
Buena (61-80)	Puntuales en techo de 3 m. cada 2,5 m. Malla ocasional	50 mm de espesor si es necesario	No
Regular (41-60)	Apernado sistemático en techo y cajas, 3 m, cada 1,2 a 2 m. Malla en techo.	50 a 100 mm espesor en techo; 30 mm de espesor en cajas.	No
Mala (21-40)	Apernado sistemático en techo y cajas, 3 a 5 m, cada 1 a 1,5 m. Enmallado total	100 a 150 mm espesor en techo; 100 mm de espesor en cajas.	Marcos livianos, puntuales.
Muy Mala (<20)	Apernado sistemático en techo y cajas. Enmallado total.	150 a 200 mm espesor en techo; 150 mm de espesor en cajas. Instalación inmediata después de tronadura.	Marco medianos a pesados cada 0,75 m. Y uso de mallas.

Fuente: Excavaciones subterráneas en roca Bieniawski, 1979

Al comprender la tabla anterior, y en el primer capítulo el Caserón Silvana obtuvo un promedio en sus pilares principales de 55 en el rating de clasificación del Rock Mass Rating, ubicando en general al macizo rocoso del caserón como calidad regular (Ver Figura 1-8), presentando en la mayoría de sus pilares una humedad relativa, que en algunos casos se condicionaba a goteos, como también en su mayoría, predominaban la zona sin humedad en caja y techo del caserón. Dando por hecho que necesita un sistema de sostenimiento para establecer mayor seguridad en el caserón.

Como indica la preposición de Bieniawski, al pertenecer un macizo rocoso de calidad regular el tipo de fortificación que debería presentar, constaría de un apernado sistemático en techo y cajas de 3 metros de profundidad, cada 1,2 a 2 metros presentando malla en techo y en caja para darle más seguridad al caserón, acompañado de Shotcrete de 50 a 100 mm espesor en techo; 30 mm de espesor en cajas, sin ningún tipo de marco. (Ver Tabla 3-2)

El perno más óptimo se debe adecuar a dos tipos de condiciones, en una se implementaría para la zona que no presenten humedad, como en la mayoría del caserón en su respectivo techo y caja, se utilizara el perno helicoidal con lechada, debido a su gran cantidad de soporte y fácil instalación acompañado de una malla, así obtendrá mayor consistencia considerando que es un caserón de producción de una vida útil estimada de 8 meses, donde transita mucho personal y maquinaria, además de presentar labores de tronadura, a esto se le añade la presión considerable que se ejerce en el caserón por la cercanía con otras labores de producción, al ser un método de explotación de subniveles y caserones a pesar de que presenta pilares de auto soporte de una roca de calidad regular según el R.M.R. calculado en el primer capítulo, por lo tanto para poder implementar mayor seguridad al caserón, se le añadirá Shotcrete para que se minimice o anule toda posible causa de un accidente por caída de roca en el caserón.

La otra condición es para las zonas que presenten humedad como algunos de los pilares principales, debido que al presentar humedad el perno helicoidal con lechada es ineficaz, perdiendo resistencia con el tiempo debido a que se ablanda el terreno, y si hay mucha agua no se seca la lechada, no cumpliendo con su función, por lo tanto, se ocupara el perno Split-set, pero la desventaja de este perno es que su uso es temporal, al ser una labor de una vida útil de 8 meses aproximados, por lo mismo se reforzará con malla y Shotcrete igualmente, para otorgar una mayor seguridad en toda su vida útil y presentar o anular la mayor cantidad de riesgos asociados a caída de rocas.

Todo este sistema de fortificación se adecuará a las condiciones y factores que inciden en una selección del método de fortificación del Caserón Silvana específicamente cumpliendo con las exigencias técnicas que éste demanda, siempre antes de todo procedimiento en terreno de minería subterránea, es de vital importancia acuanar, ya que con el tiempo las condiciones pueden ir cambiando tanto para bien como para mal, entonces constantemente hay que tener un control del macizo rocoso acuanando.

3.3. SECUENCIA OPERACIONAL Y GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE FORTIFICACIÓN SELECCIONADOS.

En lo siguiente se demostrará, describirá y señalará las generalidades y secuencia operacionales de la ejecución e implementación del sistema de fortificación seleccionado para cajas o paredes y techo de la galería a fortificar, complementando el soporte al sostenimiento de la roca. Cabe señalar que el apernado será de forma sistemática, lineal cada 1.2 a 2 metros.

3.3.1. Empleo de perno helicoidal con malla

a) Generalidades

- El apernado consiste en introducir en una perforación, pernos de acero helicoidales de alta resistencia, de 22 mm de diámetro y 2,20 m de longitud, una placa o golilla de 20 cm² y/o tuerca en su extremo, creando una zona de compresión entre estos puntos. El elemento ligante utilizado en la colocación del perno debe emplearse encartuchado o inyectado. Tienen una capacidad de soporte de 14 ton.
- La perforación e inyección de los pernos se realizará mediante el uso de equipo de perforación manual y equipo de levante con protección del techo.
- La perforación de los barrenos se hará en sentido perpendicular a la superficie de la roca expuesta de manera sistemática y forma lineal, con un espaciamiento de 1.2 a 2 metros entre pernos o perforación.
- Se debe comenzar por el techo desde la zona segura a la zona no fortificada, para luego culminar con las cajas o paredes.
- El diámetro de perforación será de 37 mm.
- La densidad de pernos más utilizada será la de 1.0 x 1.0 m².

- En zonas donde existan estratos paralelos, formando techos planos, dependiendo del espesor de los estratos, la longitud de los pernos podrá ser mayor que la estandarizada. Esta condición atípica será evaluada y estandarizada por el Jefe de Mina.

b) Secuencia operacional

- Previo a la colocación de pernos se deberá chequear las condiciones de la labor, y proceder a reacuar cada vez que se requiera.
- Realizar las perforaciones designadas, de forma lineal y sistemática con un espaciamiento de 1.2 a 2 metro entre las perforaciones, comenzando por el techo desde la zona segura hasta la no fortificada, seguida de sus cajas o paredes.
- La dosis recomendada de lechada en peso es:
 - Cemento: 42,5 kg.
 - Agua: 13,0 lt.
 - Aditivo: 350 cc.
- Mezclar la solución con agregado de cemento en forma lenta, disolviendo los grumos, hasta lograr una pasta uniforme y homogénea. Una vez lograda la consistencia, vaciarla a la lechadora y remezclar nuevamente.
- En el extremo de la válvula de impulsión se colocará una manguera de PVC, con un largo que sobresalga al menos 50 cm del tiro.
- El operador cada vez que cargue o descargue la lechada, deberá despichar la lechadora.
- Las conexiones de las mangueras deben ser aseguradas con cadenas, para evitar que la presión ejercida por la bomba inyectora y el aire comprimido provoquen su desacople.
- Una vez impulsada la lechada se retirará lentamente la manguera de la perforación, para que no queden bolsas de aire en la columna del tiro.
- Terminada esta operación se introducirá el perno completo. Todo el largo del perno debe quedar ligado por la lechada o resina a la perforación.
- Cuando la colocación del perno sea totalmente vertical, es recomendable flectarlo un poco, así se evitará que se devuelva.
- Una vez terminada la lechada de pernos, se espera el tiempo de fraguado, para luego proceder con la colocación de la malla.

c) Instalación malla

- Para realizar la operación, deberá existir una superficie de trabajo, lo más pareja posible, con una altura que permita a los operarios trabajar cómodamente cerca del techo. Para ello la plataforma de trabajo puede ser un equipo de levante con protección contra la caída de roca.
- El lugar de trabajo deberá contar con buena iluminación, de preferencia con focos halógeno o leds.
- Reacunar techos y cajas las veces que sea necesario.
- La malla a utilizar será del tipo bizcocho, galvanizada, alambre N°6 BWG, de 2,20 m de ancho y 25 m de largo.
- La fortificación se llevará por paños a todo lo ancho del rollo de malla.
- Se iniciará el trabajo perforando el tiro central de 2,20 m de longitud en el techo de la galería.
- Luego se ubicará la malla, mediante rollizos, y se colocará el perno central con su respectiva planchuela.
- Posteriormente se harán las perforaciones hacia los costados, de la forma que, los operarios trabajen siempre bajo la zona enmallada.
- Los paños deben tener un traslape de 20 cm.
- La malla debe quedar adosada a la roca en todo el contorno del techo. No está permitido dejar vacíos en las zonas con irregularidades.
- Si se va a instalar malla en las cajas, primero se hará el traslape, amarrando el paño con alambre en toda su extensión, luego se colocarán los pernos.
- También se pueden utilizar pernos Split-set con malla, en conjunto con el perno lechado. En zonas muy fracturadas se le puede agregar una capa de shotcrete de 5 cm de espesor.

3.3.2. Empleo de perno Split-Set con malla

- La fortificación se realizará de acuerdo al programa de trabajo, el cual evalúa los sectores críticos a intervenir primero.
- La primera actividad a realizar es la acunadura al sector, esta debe realizarse tanto al techo y cajas de la labor, teniendo el lugar de trabajo seguro se procede a marcar con pintura la distribución de los tiros que se deben perforar, el espaciamiento del perno es de una distancia de un metro entre perno y perno a colocar. El jefe de turno debe evaluar las condiciones del terreno, si es necesario debe aumentar la densidad y distribución de los pernos.
- Se procede a realizar la perforación de los tiros con máquina manual, el largo del tiro a perforar dependerá de la longitud del Split-set a instalar. La perforación

segura debe realizarse avanzando hacia la frente o desde la zona segura, hacia la zona no fortificada, siempre teniendo el techo acunado o fortificado.

- El desarrollo de la perforación se realizará en forma ordenada por corrida sistemática de pernos lineal con un espaciamiento de 1.2 a 2 metros, se debe evaluar la perforación e instalación de pernos puntuales previamente.
- Por las dimensiones de la malla (2.5 m), una vez perforado ya tres corridas que tienen un espaciamiento de 1.2 a 2 metros con cada perno, se procese a instalar malla con Split-set. Tienen una capacidad de soporte de 12 ton.
- En la tercera corrida se debe instalar la segunda malla que va traslapada con la primera.
- Se distribuye la malla en la labor, de caja a caja o en sector programado por operaciones mina, para comenzar a fijarla desde el centro de la labor a las cajas.
- El traslape mínimo que debe existir entre malla y malla es de 15 cm, la malla se va tensando e instalando los Split-set.
- La malla debe quedar adosada al cerro, si fuera necesario se instalarán Split-set en los sectores que se necesite adosar.
- Antes de instalar la malla se deberá retirar todo el material (fierros, trozos de Split-set, etc.) que esté en el área a fortificar, esto con el fin de evitar que quede atrapada con la malla al ser instalada.
- Se deja el sector limpio y ordenado, todos los despuntes deben eliminarse a lugar de residuos autorizados y destinado para estos.

3.3.3. Proyección del shotcrete

a) Generalidades

- El concreto proyectado neumáticamente contribuye favorablemente al sostenimiento de la roca. La fuerza de impacto del concreto sobre la superficie permite una buena compactación de los materiales. Ha demostrado ser un método eficiente, seguro y versátil, ya que puede ser empleado solo o combinado con anclajes o marcos metálicos. Se puede emplear en casi todos los tipos de roca, salvo en zonas muy blandas o con abundancia de agua.

b) De la operación

- Antes de iniciar la operación de shotcrete se debe asegurar que la labor se encuentre bien acunada si es que no presenta malla.
- El sector donde se trabajará deberá ser debidamente señalizado y aislado. Solamente el personal estrictamente necesario permanecerá en el lugar.

- El sector de trabajo deberá contar con iluminación adecuada. De preferencia con focos leds.
- Las filtraciones de agua que existan en el techo de la labor, deberán ser entubadas, canalizadas, desviadas o bloqueadas, para evitar que el agua entre en contacto con el hormigón.
- Antes de usar la máquina shotcrete se deberá verificar:
- Que no existan escapes de aire en todo el recorrido de las mangueras.
- El adecuado funcionamiento de las válvulas de impulsión.
- El estado de las conexiones de mangueras, las cuales deben estar dotadas de sus correspondientes cadenas de seguridad y abrazaderas.
- La estabilización de la shotcretera, y que sus ruedas estén bien niveladas con el suelo.
- Se debe lavar la superficie sobre la cual se aplicará el shotcrete con una mezcla de aire y agua.
- Se debe verificar que los materiales y la dosificación de la mezcla típica estén de acuerdo a las siguientes especificaciones, en seco por peso:
- Cemento: 15 a 20%
- Agregados gruesos: 30 a 40%
- Arena: 40 a 50%
- Acelerantes: 2 a 5%

El pitonero (persona encargada del control del pitón y, por lo tanto, de la proyección del hormigón):

- Deberá estar con su respectivo equipo de protección personal y mantener un permanente control sobre el lugar de trabajo, el cual debe encontrarse siempre bien iluminado.
- Evitará que la proyección del shotcrete sea dirigido hacia una persona.
- Permitirá que los agregados que componen el shotcrete circulen a velocidades entre 30 a 90 m/seg. para lograr una buena adherencia a la roca regulado por la presión del motor.
- Debe sostener firmemente el pitón con ambas manos por la parte de atrás de la boquilla, de manera que la salida del shotcrete esté lo suficientemente alejado de la cara.
- Debe mantener el pitón a una distancia aproximada de 1 metro de la superficie a shotcretear.
- La primera capa de hormigón deberá cubrir completamente la malla.

- Con el shotcrete se puede lograr cualquier espesor, se aplica en capas de 5 cm cada una, cada capa formada por 2 a 3 pasadas.
- Entre cada capa se debe dejar pasar de 6 a 8 horas para permitir el fraguado. Si se emplea acelerador puede ser 2 horas.
- El pitonero, al trabajar sobre un andamio portátil, el culebrón (manguera de goma reforzada empleada para alimentar de agua o aire comprimido a los equipos de perforación o palas neumáticas, como también para amarrar una cañería a otra) debe ser amarrado a éste.
- Solamente el operador de la shotcretera tendrá acceso a los comandos.
- Una buena proyección de shotcrete no debe tener un rechazo superior al 15%.
- La boquilla del pitón debe mantenerse perpendicular a la superficie y a un metro de distancia. A medida que aumenta el ángulo de disparo y la distancia entre la boquilla y la superficie, aumentará el porcentaje de rechazo.
- La presión de aire deberá mantenerse constante, de lo contrario el material será proyectado a menor velocidad, no impactando con fuerza, obteniéndose un shotcrete poroso, menos impermeable y con menor firmeza.
- Cuando el chorro se haga intermitente, se deberá desviar la boquilla del punto de colación, hasta que se restablezca, de lo contrario el chorro de aire y agua que sopla sobre el shotcrete fresco, tiende a levantarlo o hundirlo en forma dañina.
- Para controlar el espesor del shotcrete, se colocarán clavos de la longitud necesaria, al aplicar la primera capa.
- Al finalizar la jornada de trabajo se debe dejar todo el equipo limpio, adoptando las siguientes precauciones:
- Antes de iniciar la limpieza de la shotcretera se deberá desconectar la alimentación de aire y despichar el equipo.
- Formas de eliminar las obstrucciones del culebrón o pitón:
- Cuando se produce la obstrucción en el culebrón, el pitonero desviará el pitón fuera del alcance de las personas.
- Se detendrá inmediatamente la operación y se iniciará el proceso de destape, colocando la máquina en neutro y despresurizando el material que ha quedado al interior del culebrón y la máquina shotcretera.
- Detenida la máquina se retirará el culebrón y el pitón. Desde este extremo y con una masa se comienza a golpear el culebrón ablandando la mezcla interior y levantándolo de manera de ir vaciando la mezcla. No se podrá eliminar la obstrucción con agua a presión, por tratarse de shotcrete en seco, solo se puede usar con el shotcrete vía húmeda.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar este trabajo, se logra comprender mejor los diversos conceptos asociados a la caída de rocas y como hacer frente a este fenómeno, siendo ésta un condicionante constante al realizar laboreo en minería subterránea. La seguridad minera es sumamente importante, debido a que, influye directamente en las vidas de los trabajadores, además de los equipos mineros, para esto el Decreto Supremo 132 exige una implementación de la fortificación si la condición del macizo rocoso no es auto soportable, para que las posibilidades de accidentes se vean reducidas en gran medida. La operación de fortificación es de carácter esencial en la minería, siendo más que un trabajo netamente productivo, una labor vital para dar seguridad al proceso total, sin dejar de lado antes de cualquier procedimiento la correcta ejecución de la acuñadura.

En la mina subterránea Pullali, el comportamiento de la roca se ve alterado por diversos factores como la presencia de fallas, discontinuidades, fracturas, entre otros, las que modifican e influyen en gran medida en el comportamiento de la roca y su resistencia frente a los diversos esfuerzos que le son aplicados durante todo el tiempo, es por esto que se recomienda siempre ir chequeando constantemente el macizo rocoso para tener un mayor control de este y así evitar accidentes.

Finalmente según lo investigado, en la zona Sureste de la mina se encuentra la zona más crítica, en cuanto a fallas geológicas presentes en el yacimiento, específicamente en el Caserón Silvana, en el cual mediante una herramienta muy utilizada para calificar el macizo rocoso, se analizaron sus pilares principales, ubicando en general al macizo rocoso del caserón, como regular, además de presentar una humedad relativa, factor muy importante a la hora de elegir un método de fortificación, ya que debilita la zona y anula ciertos elementos de fortificación. Al ubicarse el caserón en los últimos niveles de la mina, este tiene que soportar presiones no menores de forma constante, lo que da indicio de que la roca necesita algún soporte o procedimiento que proporcione mayor estabilidad al macizo rocoso.

Para cerrar este trabajo de título, mediante estudios empíricos y luego de analizar todos los sistemas de sostenimiento, se llega a la conclusión de plantear una propuesta de fortificación combinada, la que consta de perno, malla y shotcrete para el caserón más crítico mencionado anteriormente, con la finalidad de dar más seguridad a

la labor y no tener accidentes fatales o incapacitantes que influyan en el desarrollo de la producción.

BIBLIOGRAFÍA

KLEIN, Cornelius y S. HURLBUT JR, Cornelius. Manual de Mineralogía. España: Editorial Reverte S.A. 2003. Cuarta edición. Volumen 2.

SERNAGEOMIN. Guía N.º 5 de operación para la pequeña minería: fortificación y acuñadura. [En Línea] [Consulta: Mayo 2016]. Disponible en: <<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/G5FortificacionAcunadura.pdf>>

ACHS. Acuñadura manual. [En Línea] [Consulta: Junio 2016]. Disponible en: <<http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/acunadura-manual.pdf>>

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

ROCSCIENCE INC. (2004). www.rocscience.com. Retrieved from https://www.rocscience.com/help/unwedge/webhelp/unwedge/Shotcrete_Support_Force.htm

C. LARA, R. REZA. (2002). Caracterización geomecánica del macizo rocos para el diseño de las labores mineras e implementación de un sistema de fortificación