

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis del dique tapón para la reducción de costos
en el método de explotación sublevel stoping
en la unidad minera Cerro Lindo de Nexa
Resources Perú S.A.A. - 2020**

Anthony Richard Ordoñez Sanchez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Ing. Javier Córdova Blancas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre por estar junto a mí en todos estos años, brindándome su apoyo en todo aspecto, agradezco a Dios por darme una madre con tan maravillosa fortaleza de sacarme adelante, e inculcarme desde muy pequeño que uno no es lo que dicen, uno es lo que quiere ser y lo demuestra con acciones, por ello, quiero agradecer a mi madre querida.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias al respaldo de mi madre, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo incondicional, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos, le agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ella, mi hermosa madre.

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón este logro obtenido a mi familia, ya que fueron el motor y motivo de mi superación y gracias a ello formarme como persona de bien para la sociedad, así mismo a mis docentes de la Universidad Continental, por la formación forjada durante estos años de arduo estudio.

RESUMEN

La presente investigación realiza el análisis de los diferentes diques tapón usados en el método de explotación *sublevel stoping* de la unidad minera Cerro Lindo de *Nexa Resources* Perú S. A. A. - 2020, con el objetivo de la reducción de costos en el método de minado aplicado en la unidad minera.

Durante la ejecución de la presente tesis se optó por aplicar el método analítico, siendo la investigación de un alcance descriptivo-explicativo. El diseño de la investigación es preexperimental, de tal forma que se observó, analizó e interpretó el diseño y costeo de los diferentes diques tapón usados en la explotación de los diferentes tajeos mediante el método de minado *sublevel stoping*, en un periodo de 12 meses del 2019. La técnica de recolección de datos fue el análisis e interpretación de información documental y el acopio de datos de campo correspondientes a la unidad minera Cerro Lindo.

Finalmente, se concluye con el análisis e interpretación de diseño y costeo de los diferentes diques tapón usados en el método de minado *sublevel stoping*, de la unidad minera Cerro Lindo, teniendo en consideración el uso del relleno en pasta para el rellenado de los diferentes tajeos minados por el método de minado de estudio.

Durante el periodo 2019, se construyeron un total de 415 diques tapón con una incidencia del 78% para dique muro de concreto, el 18% para dique tapón de desmonte y el 3% para dique tapón de madera.

Así mismo, durante el periodo enero a setiembre del 2020, se construyeron un total de 266 diques tapón con una incidencia del 59% para dique muro de concreto, con el 38% para dique tapón de desmonte y 3% para dique tapón de madera.

La relación de menor incidencia de construcción de dique muro de concreto fue de 64% y se incrementó en 34% la construcción de dique tapón de

desmonte entre ambos periodos, lo que permite un descenso sustancial de los costos de mina.

Finalmente, la productividad asociada al costo de dique tapón con el tonelaje producido durante el periodo 2019 fue de 0.40 US \$/t, y la productividad del costo de dique tapón con el tonelaje producido durante el periodo enero a setiembre del 2020 es de 0.32 US \$ /t, producto de una mayor incidencia del dique tapón de desmonte comparado con el dique muro de concreto.

Palabras clave: costos operacionales, dique tapón, método de minado.

ABSTRACT

This research performs the analysis of the different plug dikes used in the sublevel stoping exploitation method of the Cerro Lindo mining unit of Nexa Resources Peru SAA - 2020, with the objective of reducing costs in the mining method applied in the unit mining.

During the execution of this thesis, it was decided to apply the analytical method, the investigation being of a descriptive-explanatory scope. The research design is pre-experimental, in such a way that the design and cost of the different plug dikes used in the exploitation of the different pits by means of the sublevel stoping mining method was observed, analyzed, and interpreted, in a period of 12 months of the 2019. The data collection technique was the analysis and interpretation of documentary information and the collection of field data corresponding to the Cerro Lindo mining unit.

Finally, we conclude with the analysis and interpretation of the design and costing of the different plug dikes used in the sublevel stoping mining method of the Cerro Lindo mining unit, taking into consideration the use of paste fill to fill the different pits. mined by the study mining method.

During the 2019 period, a total of 415 plug dikes were built with an incidence of 78% for concrete wall dike, 18% for waste plug dike and 3% for wooden plug dike.

Likewise, during the period January to September 2020, a total of 266 plug dikes were built with an incidence of 59% for concrete wall dike, with 38% for waste plug dike and 3% for wooden plug dike.

The ratio of the lowest incidence of concrete wall dam construction was 64% and the construction of the cut-off dam increased by 34% between both periods, which allows a substantial decrease in mine costs.

Finally, the productivity associated with the cost of the plug dock with the tonnage produced during the 2019 period was 0.40 US \$ / t, and the productivity of the cost of the plug dock with the tonnage produced during the period January to September 2020 is 0.32 US \$ / t, product of a higher incidence of the cut-off plug dike compared to the concrete wall dike.

Keywords: mining method, operational costs, plug dike .

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Asesor	II
Agradecimiento	III
Dedicatoria	IV
Resumen	V
Abstract	VII
Índice de contenidos	VIII
Lista de tablas	XII
Lista de figuras	XIV
Introducción.....	XVII
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	19
1.1. Planteamiento y formulación del problema	19
1.1.1. Planteamiento del problema.....	19
1.1.2. Formulación del problema	20
1.2. Objetivos	20
1.2.1. Objetivo general	20
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
1.3. Justificación e importancia	21
1.3.1. Justificación social - práctica	21
1.3.2. Justificación académica.....	22
1.4. Hipótesis de la investigación.....	22
1.4.1. Hipótesis general.....	22
1.4.2. Hipótesis específicas.....	22
1.5. Identificación de las variables	22
1.5.1. Variable independiente.....	22
1.5.2. Variable dependiente.....	22
1.5.3. Matriz de operacionalización de variables.....	23
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes del problema	24
2.1.1. Antecedentes nacionales	24
2.1.2. Antecedentes internacionales	25
2.2. Generalidades la unidad minera cerro lindo.....	27
2.2.1. Ubicación, accesibilidad y generalidades	27

2.3. Geología general	28
2.3.1. Geología regional	28
2.3.2. Geología local.....	29
2.3.3. Geología económica.....	31
2.3.4. Geología estructural	31
2.4. Maciso rocoso.....	38
2.4.1. Roca intacta	38
2.4.2. Índice rqd.....	40
2.4.3. Clasificación geomecánica	42
2.4.4. Propiedades de resistencia y elásticas del macizo rocoso.....	49
2.4.5. Condiciones de esfuerzos in situ	51
2.5. Método de explotación	58
2.5.1. Sublevel stoping	58
2.5.2. Ventajas	58
2.5.3. Desventajas.....	59
2.6. Ciclo de minado	59
2.6.1. Sostenimiento.....	59
2.6.2. Perforación	60
2.6.3. Voladura.....	61
2.6.4. Ventilación.....	62
2.6.5. Desate mecanizado.....	62
2.6.6. Limpieza y transporte	63
2.7. Bases teóricas del estudio	64
2.8. Caracterización geotécnica del relleno de mina.....	64
2.8.1. Propiedades granulométricas del relleno	64
2.8.2. Resistencia del relleno	65
2.9. Diseño de tapones	66
2.9.1. Consideraciones de diseño	66
2.9.2. Diseño del tapón de concreto armado.....	68
2.9.3. Diseño de tapón de desmonte de mina más muro de piedra emboquillada.....	73
2.9.4. Diseño del tapón de madera	78
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	81
3.1. Método y alcances de la investigación.....	81

3.1.1. Método de la investigación	81
3.1.2. Alcances de la investigación	82
3.2. Diseño de la investigación	82
3.2.1. Tipo de diseño de investigación	82
3.3. Población y muestra	82
3.3.1. Población.....	82
3.3.2. Muestra	83
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	83
3.4.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos.....	83
3.4.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos	83
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	84
4.1. Consideraciones generales del estudio	84
4.2. Parámetros de dique tapón de concreto armado	86
4.3. Parámetros de dique tapón de desmonte más piedra	87
4.4. Parámetros de dique tapón de desmonte más puntales de madera.....	88
4.5. Análisis de costos de dique tapón.....	90
4.6. Análisis de reducción de costos mediante el uso de dique tapón de desmonte	97
Conclusiones.....	100
Recomendaciones.....	102
Lista de referencias	103
Anexos	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables	23
Tabla 2. Accesibilidad a la unidad minera Cerro Lindo	28
Tabla 3. Características físicas de los sistemas de familias predominantes en el OB2	37
Tabla 4. Características físicas de los sistemas de familias predominantes en el OB5	38
Tabla 5. Valores representativos de densidad, UCS, σ_t y constante m_i del criterio de resistencia.....	40
Tabla 6. Parámetros de clasificación.....	43
Tabla 7. Clases de macizo rocoso y sus índices RMR.....	43
Tabla 8. Variabilidad de la clasificación geomecánica RMR en los cuerpos OB2 y OB5	49
Tabla 9. Parámetros de resistencia del macizo rocoso para el OB5.....	51
Tabla 10. Ubicación de ensayos de esfuerzos in situ mediante overcoring	53
Tabla 11. Resultados de los esfuerzos in situ mediante overcoring	53
Tabla 12. Esfuerzos in situ a 60 m, mediante emisión acústica	54
Tabla 13. Esfuerzos in situ a 120 m, mediante emisión acústica	54
Tabla 14. Propiedades físicas y resistencia del relleno	66
Tabla 15. Parámetros de anclaje de muro de concreto armado.....	72
Tabla 16. Propiedades mecánicas de la madera	79
Tabla 17. Resultados de los índices y calidad del macizo rocoso.....	86
Tabla 18. Parámetros de diseño de tapón de concreto armado.....	87
Tabla 19. Parámetros de diseño de tapón de desmonte de mina más piedra .	88
Tabla 20. Parámetros de diseño de tapón de desmonte de mina más puntales de madera	89
Tabla 21. Precios unitarios de diseño de tapón de concreto armado.....	91
Tabla 22. Precios unitarios de diseño de tapón de desmonte de mina más piedra	92
Tabla 23. Precios unitarios de diseño de tapón de desmonte de mina más puntales de madera.....	93
Tabla 24. Costos de producción de dique tapón durante el periodo 2019, unidad minera Cerro Lindo.....	94

Tabla 25. Costos de producción de dique tapón durante el periodo 2020, unidad minera Cerro Lindo.....	94
Tabla 26. Productividad dique tapón, periodo 2019 a 2020, unidad minera Cerro Lindo.....	98
Tabla 27. Producción periodo 2020, unidad minera Cerro Lindo	98
Tabla 28. Matriz de operacionalización de variables.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plano de ubicación del proyecto unidad minera Cerro Lindo	27
Figura 2. Detalle de cuerpos mineralizados, en planta.....	31
Figura 3. Polilíneas de las fallas (Milpo) para cada nivel en Leapfrog.....	32
Figura 4. Data de taladros geotécnicos (Milpo) en Leapfrog.	33
Figura 5. Discos orientados para representar las superficies de las fallas registradas (data SVS y Milpo) en Leapfrog	33
Figura 6. Modelo 3D de superficie de falla en los cuerpos OB2 y OB5.....	34
Figura 7. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el SPP y SPB del cuerpo OB2	35
Figura 8. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el SPP y SPB del cuerpo OB5.	35
Figura 9. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el volcánico del cuerpo OB2.	36
Figura 10. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el volcánico del cuerpo OB5.	36
Figura 11. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el dique del cuerpo OB2.....	36
Figura 12. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el dique del cuerpo OB5.....	37
Figura 13. Valores de resistencia a la compresión simple	39
Figura 14. Comportamiento del RQD para el OB2 y OB5.	41
Figura 15. SPP: grano medio a grueso	44
Figura 16. SPB: grano grueso a medio	44
Figura 17. Contacto caja techo volcánico – mineral	45
Figura 18. Caja techo cercana – transición volcánica – SPP	46
Figura 19. Dominio geotécnico del dique; sondajes CL10 507 y CL10 501	47
Figura 20. Isovalores de RMR – OB5 para los niveles: 1680, 1710, 1740 y 1770.	48
Figura 21. Análisis estadístico de los valores de RMR para los cuerpos OB5 Y OB2 respectivamente.	49
Figura 22. Estimación de las propiedades elásticas del macizo rocoso.	51
Figura 23. Ubicación de ensayos de esfuerzos in situ mediante overcoring. ..	52

Figura 24. Orientaciones del esfuerzo principal - OB5.....	56
Figura 25. Orientaciones del esfuerzo principal - OB2.....	56
Figura 26. Contactos en los diques en OB5 (naranja) y OB2 (azul).....	57
Figura 27. Isométrico del método de sublevel stoping en la unidad minera Cerro Lindo.....	58
Figura 28. Tabla geomecánica de la unidad minera Cerro Lindo.....	60
Figura 29. Equipo perforador fontanero en perforación.....	61
Figura 30. Frente cargado y amarrado.....	61
Figura 31. Detector de gases.....	62
Figura 32. BTI desatador mecánico.....	63
Figura 33. Scoop para limpieza de frente.....	63
Figura 34. Historia de granulometría.....	65
Figura 35. Evolución de la resistencia a la compresión.....	66
Figura 36. Secuencia de llenado de tajeos.....	67
Figura 37. Presiones del relleno sobre el tapón a lo largo de la secuencia de llenado.....	68
Figura 38. Modelo bidimensional del tapón en SAP2000.....	69
Figura 39. Momento flector en la dirección horizontal en el tapón.....	70
Figura 40. Momento flector en la dirección vertical en el tapón.....	70
Figura 41. Acero de refuerzo horizontal necesario en el tapón.....	70
Figura 42. Acero de refuerzo vertical necesario en el tapón.....	71
Figura 43. Distribución de cargas a lo largo del muro de concreto armado	72
Figura 44. Reacciones en los pernos de anclase.....	72
Figura 45. Vista longitudinal tapón de desmonte de mina más muro de piedra emboquillada.....	77
Figura 46. Sección transversal de tapón de desmonte más muro de piedra emboquillada.....	77
Figura 47. Valores del esfuerzo a la tensión de la madera respecto del contenido de humedad.....	78
Figura 48. Modelo estructural del soporte de madera del tapón en SAP2000 .	79
Figura 49. Vista longitudinal y transversal del tapón de desmonte de mina más muro de puntales de madera.....	80
Figura 50: Evolución de la resistencia a la compresión para los tajeos TJ 925, TJ 950, TJ 004, TJ 006, TJ 881.....	85

Figura 51. Presiones del relleno sobre el tapón a lo largo de la secuencia de llenado.....	86
Figura 52. Secuencia de llenado del relleno para garantizar la estabilidad de los taponos.....	90
Figura 53. Promedio muro de concreto con incremento de costos por sobre excavación de los tajeos por voladura.....	96
Figura 54. Productividad de dique tapón periodo 2019 a 2020, unidad minera Cerro Lindo.....	99
Figura 55. Plano en planta del ore body OB 2, unidad minera Cerro Lindo ...	106
Figura 56. Plano geomecánico del ore body OB 5, U. M. Cerro Lindo.....	107
Figura 57. Plano de cable bolting, aplicado en tajeos, U. M. Cerro Lindo	108
Figura 58. Plano de secuencia de minado de tajeos, ore body 5, unidad minera Cerro Lindo.....	109
Figura 59. Plano de secuencia de minado de tajeos, ore body 2, unidad minera Cerro Lindo.....	110
Figura 60. Plano de secuencia de minado sublevel stoping, unidad minera Cerro Lindo.....	111
Figura 61. Diseño de dique tapón de desmonte, unidad minera Cerro Lindo	112

INTRODUCCIÓN

Una de las características de la unidad minera Cerro Lindo, los diferentes tajeos minados por el método de explotación *sublevel stoping* han sido rellenos con el tipo de relleno en pasta, este relleno es para formar un pilar de relleno que establezca la extracción de los diferentes tajeos secundarios adyacentes.

El uso y diseño de los diferentes diques tapón considera la caracterización geotécnica de los materiales a utilizar, geometría de los accesos y diques a ser utilizados, análisis de estabilidad y secuencia de construcción de los diferentes diques tapón, el objetivo de este dique tapón es poder contener el relleno en pasta, al interior del tajo y así evitar la filtración o desplazamiento del relleno en pasta hacia el exterior.

Por tal motivo, la presente tesis permite realizar un análisis de diseño y costo de los diferentes tipos de diques tapón usados en los diferentes tajeos minados por el método de explotación *sublevel stoping*, para ser estabilizado con el relleno en pasta en la unidad minera Cerro Lindo, presentando lo siguiente:

En el Capítulo I se describe el tema de forma de la presente tesis, describiendo los aspectos de la investigación que se utilizó en el presente trabajo de investigación; se describen los objetivos, justificación e importancia, hipótesis de la investigación, identificación de variables independientes y variables dependientes y la matriz de operacionalización de variables.

En el Capítulo II se describen los antecedentes de investigación como primera aproximación del presente estudio, así como la descripción de las generalidades de la unidad minera Cerro Lindo como geología, mina, planta, etc. Finalmente, se describe el marco teórico, para consolidar el estudio de la presente tesis haciendo referencia del diseño de los diferentes diques tapón usados en la unidad minera.

En el Capítulo III se describe la metodología de investigación, así como el alcance y diseño de la investigación, el uso de la población y muestra de información y técnicas e instrumentación de recolección de datos.

Capítulo VI se analizan e interpretan los resultados del diseño y costeo de los diferentes diques tapón, para generar la reducción de costos en el uso del método de minado *sublevel stoping*, respondiendo las diferentes hipótesis planteadas en la presente tesis.

El Autor.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

La economía peruana se soporta principalmente a través de sus recursos naturales que posee, donde la minería es un pilar muy importante en el desarrollo social y económico del país. Los recursos minerales que posee el Perú son muy importantes en las reservas mundiales, siendo el cobre su principal *commodity* que genera una de las mayores divisas al fisco peruano, siendo el oro, la plata, el plomo, el zinc, etc., los que aportan un mayor atractivo a las exploraciones en el territorio peruano.

El tipo de relleno que se aplica en los diferentes tajeos a ser minados en labores subterráneas, depende directamente del método de minado, del tipo de relleno a ser usado y de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. En la unidad minera Cerro Lindo se ha venido empleando el relleno en pasta en su ciclo de minado por el método de explotación *sublevel stoping*. En este proceso de relleno implica varias actividades previas para lograr un vertimiento de relleno con calidad en los tajos vacíos, una vez culminada la extracción de mineral.

La estabilidad de los tapones para la contención del relleno forma parte integral del sistema de relleno. Anteriormente, en Cerro Lindo se instalaban

tapones de desmonte más muro de piedra, tapones de madera y actualmente con mayor frecuencia, tapones de concreto con refuerzo estructural conformado por una malla de fierros corrugados y barras de acero para el anclaje a la roca; sin embargo, se implementó un nuevo diseño utilizando diques de desmonte con la finalidad de reducir tiempos y costos.

Los tapones son construidos en las labores de acceso de los tajeos con el objetivo de contener el relleno.

Una falla en el tapón provocará que el relleno en pasta no consolidado ubicado dentro de tajeo pierda el confinamiento al que está sometido e ingrese a las labores de acceso. El ingreso del lodo es violento y puede tener consecuencias significativas tales como: poner en peligro la seguridad del personal, daños a la propiedad y pérdida y retrasos en la producción.

1.1.2. Formulación del problema

Problema general

¿Cuál es el resultado del análisis de los diferentes diques tapón aplicados en el método de explotación *sublevel stoping* para la reducción de costos en la unidad minera Cerro Lindo?

Problemas específicos

¿Cómo aplicar los criterios del diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo?

¿Cómo mejorar la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para incorporar variables de diseño operacional en el dique tapón para la reducción de costos en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar los criterios de diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.
- b) Determinar la mejora de la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

1.3. Justificación e importancia

Con el desarrollo de la presente investigación se pretende emplear los diques tapones con diferentes materiales como contención para el relleno en todos los tajeos minados por el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

Con la aplicación de este trabajo de investigación se pudieron analizar los tiempos y costos en la preparación de diques tapones en la unidad minera Cerro Lindo.

1.3.1. Justificación social - práctica

La investigación brinda grandes aportes al sector minero, aportando conocimiento del diseño de los diques tapones como contención en el relleno en los tajos minados por *sublevel stoping* en las diferentes unidades mineras.

Así mismo, reducir los costos y tiempo en el diseño de diques tapón como contención en el relleno, en los tajeos minados por el método de minado *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

Generar programas de optimización y reducción de costos en las diferentes áreas unitarias de la extracción de mineral es de vital importancia, ya que los niveles de explotación en las diferentes unidades son cada vez más profundos, incrementando sus costos operacionales, lo que permite a la empresa estabilizar sus niveles de rentabilidad económica.

1.3.2. Justificación académica

La investigación permite el uso de diferentes herramientas académicas para aplicar en el diseño del dique tapón en el método de minado *sublevel stoping* y realizar el análisis de los diferentes rellenos a ser usados en los tajeos minados y definir los parámetros operacionales que generen programas de optimización y reducción de costos en el ciclo de minado.

La aplicación de programas de optimización y reducción de costos está asociado y normado bajo el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional, especificado en el D. S. N.º - 024 – 2016. E. M. y su modificatoria D. S. N.º 023-2017 E. M.

1.4. Hipótesis de la investigación

1.4.1. Hipótesis general

Al analizar las diferentes variables operacionales del diseño del dique tapón en el método de explotación *sublevel stoping*, permite disminuir significativamente los costos de minado en la unidad minera Cerro Lindo de *Nexa Resources* Perú S. A. A.

1.4.2. Hipótesis específicas

- a) La realización eficiente de los criterios de diseño operacional en el dique tapón permitirá controlar la mejora de la productividad en el método de explotación *sublevel stoping*, en la unidad minera Cerro Lindo.
- b) El cumplimiento seguro y eficiente del dique tapón en el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo, permitirá la mejora de la productividad y reducción de costos en el ciclo de minado.

1.5. Identificación de las variables

1.5.1. Variable independiente

Variable independiente: Método de minado *sublevel stoping*

1.5.2. Variable dependiente

Variable dependiente: Análisis del dique tapón

1.5.3. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 1.

Matriz de operacionalización de variables

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables e indicadores
<p>Problema principal ¿Cuál es el resultado del análisis de los diferentes diques tapón aplicados en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> para la reducción de costos en la unidad minera Cerro Lindo?</p> <p>Problemas específicos a) ¿Cómo aplicar los criterios del diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo? b) ¿Cómo mejorar la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo?</p>	<p>Objetivo general Desarrollar una metodología para incorporar variables de diseño operacional en el dique tapón para la reducción de costos en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo.</p> <p>Objetivos específicos a) Determinar los criterios de diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo. b) Determinar la mejora de la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo.</p>	<p>Hipótesis general Al analizar las diferentes variables operacionales del diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i>, permite disminuir significativamente los costos de minado en la unidad minera Cerro Lindo.</p> <p>Hipótesis específicas a) La realización eficiente de los criterios de diseño operacional en el dique tapón permitirá controlar la mejora de la productividad en el método de explotación <i>sublevel stoping</i>, en la unidad minera Cerro Lindo. b) El cumplimiento seguro y eficiente del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> de la unidad minera Cerro Lindo permitirá la mejora de la productividad y reducción de costos en el ciclo de minado.</p>	<p>Variable independiente Método de minado <i>sublevel stoping</i></p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geológico • Geomecánico <p>Variable dependiente Análisis de dique tapón</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geometría de diseño (mt) • Tapones de contención • Características técnicas de dique tapón • Producción de dique tapón • Análisis económico

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes nacionales

- En la tesis “*Diseño de muros de concreto armado en ventanas para optimizar relleno de tajos vacíos - U.M. Cerro Lindo –compañía minera Milpo S. A. A.*”, (1) el objetivo de la construcción de los muros de concreto armado para tajeos es dar la garantía de la resistencia de los esfuerzos que el relleno puede causar al momento del relleno de tajo. Por ello, este estudio tiene como objetivo el diseño geotécnico y estructural del muro de concreto armado. Para tal fin los alcances del presente estudio fueron los siguientes: revisión de la información existente, caracterización geotécnica del relleno de mina, caracterización geomecánica del macizo rocoso, diseño de los muros o tapones, así como la instrumentación y monitoreo. Para cumplir con los objetivos señalados anteriormente se procedió a revisar la información tales como: ensayo de gravedad específica de sólidos de relleno en pasta; ensayo de permeabilidad de relleno en pasta a 7,14,28, 59 días; estudio geomecánico para el dimensionamiento, secuencia y relleno de tajeos de la mina Cerro Lindo y reportes internos de la operación de relleno, mina Cerro Lindo (2013, 2014 y 2015). **Resultados**, con toda esta información se realizó el diseño de los muros de concreto armado mediante el uso de modelamiento numérico de las presiones del relleno sobre el tapón, diseño numérico y cálculo de anclaje del tapón. Una vez realizado el diseño se construyeron los muros de concreto

armado, en cada uno de las ventanas del Tj. 016 del Nivel 1710. Posteriormente, se llenó el relleno en pasta en el tajeo vacío, obteniéndose resultados muy satisfactorios desde el punto de vista técnico y económico. (1)

- En el informe de ingeniería "*Relleno en pasta utilizado en la mina Iscaycruz*", (2) el relleno en pasta se basa en el empleo de relaves, cemento, agua, y un químico floculante (este ayuda a separar el líquido de las partículas del relave y le da una consistencia pastosa), los cuales son dosificados y mezclados en una planta y luego transportados por una línea de tuberías hacia los niveles de la mina.

Este tipo de relleno permite tener una buena recuperación del mineral, a un bajo costo por las cantidades de cemento que se emplean. Para mantener el tipo de relleno acorde con las necesidades del método de explotación utilizado se realiza un riguroso control de calidad. Llegando a la conclusión de: esta nueva alternativa de relleno es una tecnología de última generación que brinda una mayor eficiencia en los trabajos de relleno, permite una mayor vida a los depósitos de relave, minimiza el uso de equipos en la operación y reduce costos operativos. (2)

Los desafíos actuales y futuros es construir y mejorar el ambiente minero, haciendo un sistema funcional y viable en la entrega del relleno a los tajos en las proporciones y calidades requeridas, para poder mantener una producción adecuada y al menor costo posible. En cuanto a la contracción de volumen, se observa en probeta una contracción de 3% con respecto a las probetas sin aditivo que presentan una contracción del 10%. Este aspecto es importante porque en interior de mina con volúmenes mayores se presentan fisuras verticales por donde fallaría el relleno. (2)

2.1.2. Antecedentes internacionales

- En la tesis "*Estudio de las distribuciones tensionales y de las resistencias de los rellenos de pasta de la mina subterránea de aguas teñidas (Huelva)*", (3) se considera que, para usar relleno de pasta para el sostenimiento en minería subterránea hay que tener en cuenta el cálculo de parámetros de diseño,

optimización de la mezcla, cualidades de bombeo y la operación de transporte al interior de la mina. Los gastos de esta operación minera son importantes ya que pueden representar hasta el 20%. (3)

En cuanto al uso del relleno de pasta, indica, es un componente importante en las operaciones en la minería subterránea y se está convirtiendo en una práctica habitual para su uso en muchas de ellas en el mundo. El material de relleno se coloca en cámaras previamente extraídas para proporcionar una plataforma estable para el trabajo y de soporte en las paredes adyacentes. Aparte de ofrecer un sostenimiento para muros y pilares, también ayuda a prevenir la caída del techo, y permite la recuperación del pilar, lo que aumenta la productividad. (3)

Adicionalmente, se menciona el estudio de las barricadas para el relleno de los tajos, se considera que, para usar relleno de pasta para el sostenimiento en minería subterránea hay que tener en cuenta el cálculo de parámetros de diseño, optimización de la mezcla, cualidades de bombeo y la operación de transporte al interior de la mina. Los gastos de esta operación minera son importantes ya que pueden representar hasta el 20%. (3)

- En el artículo “*Análisis de estabilidad de barricadas de roca residual diseñadas para retener el relleno de pasta*”, (4) el relleno de pasta cementada (CPB) se aplica ampliamente en las minas subterráneas de todo el mundo. Antes de rellenar el tajo, las barricadas se necesitan para construirse en bordes cercanos a los puntos de extracción para retener el relleno. Varias fallas de barricadas informadas han demostrado que la estabilidad de la barricada es crítica. Para garantizar la aplicación exitosa y segura del relleno. Las barricadas generalmente están hechas de materiales de alta resistencia como ladrillos, concreto, bloques u hormigón armado. Alternativamente, las barricadas hechas de rocas de desecho se están volviendo populares debido a su construcción simple y de bajo costo. (4)

Se propuso una solución simple para dimensionar barricadas de roca de desecho (WRB) considerando el equilibrio límite de un tridimensional Bloque rectangular (3D). Más recientemente, los autores modificaron esta solución al

considerar la estabilidad global de las barricadas trapezoidales, pero la estabilidad local no se tuvo en cuenta. En consecuencia, el tamaño de la cresta puede subestimarse, lo que lleva a un diseño no conservador. En esto, en el documento se propone una solución más completa, teniendo en cuenta la estabilidad global y local de los WRB trapezoidales. La solución analítica fue calibrada y validada mediante modelado numérico. La flexibilidad y la validez de la solución propuesta se probaron con complementarias simulaciones. (4)

2.2. Generalidades la unidad minera cerro lindo

2.2.1. Ubicación, accesibilidad y generalidades

La unidad minera Cerro Lindo está ubicada a 175 km al SE de Lima en el sur del Perú en la región de Ica, provincia de Chíncha, distrito de Chavín. De acuerdo a la carta Geología IGN 27-L y se encuentra a una altitud de 1,820 a 2,165 m s. n. m. y las coordenadas UTM son:

N: 8554400

E: 993100

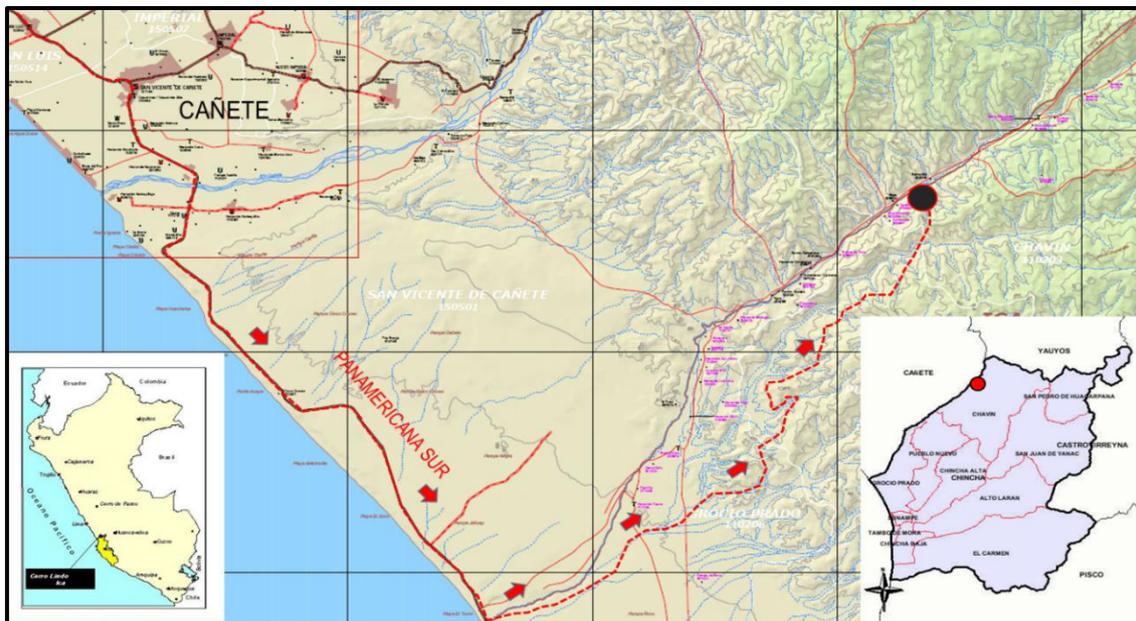


Figura 1. Plano de ubicación del proyecto unidad minera Cerro Lindo

El acceso a la unidad minera Cerro Lindo es por vía terrestre, se accede desde la carretera panamericana sur, desde Lima hasta el km 181 situado en la localidad de Jahuay, el recorrido desde la panamericana Sur hasta la unidad minera toma una hora con 45 minutos, es trocha.

Tabla 2.**Accesibilidad a la unidad minera Cerro Lindo**

Ruta	Distancia	Vía
Lima – paraje Jahuay	180 km	Asfaltado
Paraje Jahuay – Cerro Lindo	60 km	Afirmado

2.3. Geología general

El yacimiento Cerro Lindo se ubica entre rocas volcánicas de composición félsica, tanto, la caja piso y la caja techo están conformadas por rocas de tipo riolíticas gradando a riodacitas, las cuales presentan una coloración blanca grisácea con tonalidades rosadas, azulinas a verduscas. El fuerte metamorfismo ha producido texturas granoblásticas y porfidoblásticas. El ensamble mineralógico consiste en cuarzo, feldespato, biotita, sericita, andalucita y pirita.

También está presente una unidad piroclástica félsica conformada por tufos de cenizas distales y tufos lapilli polimícticos integrado por fragmentos subredondeados y bien clasificados. Esta unidad piroclástica se intercala dentro de unidades de flujos riolíticos. En los depósitos de sulfuros masivos volcánicos las exhalitas son típicas, se observan en la base o en la zona superior de los cuerpos masivos. Producto del rápido enfriamiento en el agua marina fría, de la lava caliente, se originaron estructuras de lavas almohadilladas andesíticas.

Las rocas intrusivas del Batolito de la Costa, de edad Cretácica, constituidas principalmente por granodioritas, rodean las unidades volcánicas sedimentarias.

Existen otros afloramientos, más antiguos y de mucha menor dimensión. Finalmente, existe gran cantidad de diques intruyendo las secuencias volcánicas sedimentarias, como pórfido andesítico, esta última corta incluso al intrusivo granodiorítico.

2.3.1. Geología regional

El depósito mineral de Cerro Lindo se encuentra hospedado en una serie volcánico-sedimentaria de la formación Huaranguillo del Cretáceo perteneciente al grupo Casma. Las series volcánicas del grupo Casma están dominadas por volcánicos piroclásticos de composición ácida, intercaladas con flujos lávicos de

composición andesítica. Las primeras coladas volcánicas se depositaron en una cuenca de *Back Arc* sobre un basamento más antiguo no expuesto, como resultado de movimientos tectónicos extensionales durante el proceso de subducción de la litósfera oceánica.

Las rocas volcano-sedimentarias del grupo Casma se extienden a lo largo de 1600 km en el océano Pacífico, desde la región Ica hasta la región Piura ubicado en la zona norte del Perú. Las rocas intrusivas del Batolito de la Costa del Cretáceo superior intrusionan al grupo Casma en muchas zonas a lo largo de toda su extensión. Esta franja intrusiva está compuesta de granodioritas, tonalitas, dioritas y otros. El emplazamiento del batolito ocurrió durante un periodo de 64 millones de años entre 37 Ma y 100 Ma. La intrusión del batolito generó un intenso metamorfismo de contacto en las rocas volcano-sedimentarias. En el área de Cerro Lindo, se desarrolló un metamorfismo regional de andalucita cordierita regional de grado medio.

Finalmente, diques andesítico-porfíricos instruyeron al Batolito de la Costa y a la serie volcano-sedimentaria.

Estructuralmente, el grupo Casma está cortado por varias familias de fallas generando grandes bloques estructurales.

2.3.2. Geología local

El yacimiento está emplazado entre las unidades Topará y Huapunga, que son secuencias piroclásticas distales o removilizadas, compuestas de tufos a cenizas y tufos monomícticos y polimícticos de lapilli subredondeados.

La unidad piroclástica está intercalada con unidades efusivas, mayormente brechas de flujo. Se reconocen exhalitas de potencia submétrica en los contactos inferiores y superiores de los cuerpos de sulfuros masivos.

El yacimiento de Cerro Lindo es un depósito de sulfuros masivos vulcanogénicos (VMS), cuya génesis es similar a otros depósitos VMS a nivel mundial. Hasta hoy, han sido reconocidos once cuerpos mineralizados.

El depósito de sulfuros masivos abarca una extensión mineralógica aproximada de 1350 m de largo, 83 m de ancho y 245 m de profundidad. Esta secuencia de mineral ocupa un graben de 16-M-048-14 – Milpo S. A. A.

Existe un modelamiento geomecánico 3D y una evaluación de las condiciones de estabilidad global de la mina Cerro Lindo en la intracuenca con orientación hacia el NO; el depósito está inclinado hacia el SO con un buzamiento promedio de 65°, producto de la deformación orogénica.

En la parte superior se encuentran minerales oxidados como hematita, jarosita y limonitas, producto de la oxidación de los sulfuros primarios, estos están acompañados por baritina de tipo sacaroide.

La zona intermedia es de sulfatos ricos en cobre e hidróxidos de hierro. La lixiviación de los iones metálicos de cobre es cementada al nivel inferior para formar sulfuros secundarios de cobre como calcosina y covelita.

En la zona de profundización se hallan los sulfuros primarios divididos en dos estructuras, el dominio de Zn, Ag, Pb y Ba conocido como los *Black Ore* y el dominio de Fe con Cu conocido como los *Yellow Ore*.

En Cerro Lindo se reconocen litologías de sulfuros masivos primarios, las cuales se describen a continuación:

- Sulfuro Masivo Barítico (Zn-SPB); sulfuros masivos ricos en Zn, Pb y Ag, estos sulfuros tienen baritina y la mineralización consiste en esfalerita, calcopirita y galena; la plata se encuentra en la galena argentífera. La textura de esta mineralización es bandeada.
- Sulfuro Masivo Barítico Cuprífero (Cu-SPB); sulfuros masivos ricos en Fe, Cu y Zn, tienen baritina y la mineralización consiste en pirita, calcopirita y marmatita, que es la esfalerita ferrífera.
- Sulfuro Primario Píritico (SPP); son sulfuros masivos ricos en Fe, no tienen baritina y está compuesta solo por pirita.

- Sulfuro Semimasivo (SSM); son volcánicos de la caja piso con diseminación entre 20% y 50% de sulfuros; esta litología tiene pirita, calcopirita diseminada y en venillas.

2.3.3. Geología económica

Genéticamente, el yacimiento de la mina Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcano genético VMS. Presenta una orientación noroeste, buzando al suroeste con 65° de promedio, mide aproximadamente 1,35 metros de largo, 83 m de ancho y 245 m de profundidad. Este yacimiento presenta en la actualidad siete cuerpos mineralizados denominados OB 1, OB 2, OB 3, OB 4, OB 5, OB 6 y OB 7, además de pequeños cuerpos satélites. En el presente estudio se han evaluado solamente los cuerpos mineralizados OB2 (*Ore Body 2*) y OB5 (*Ore Body 5*). Estos tipos de depósitos han sido relacionados al modelo *Kuroko*, basados en la similitud de su formación, edad y la presencia de la baritina.

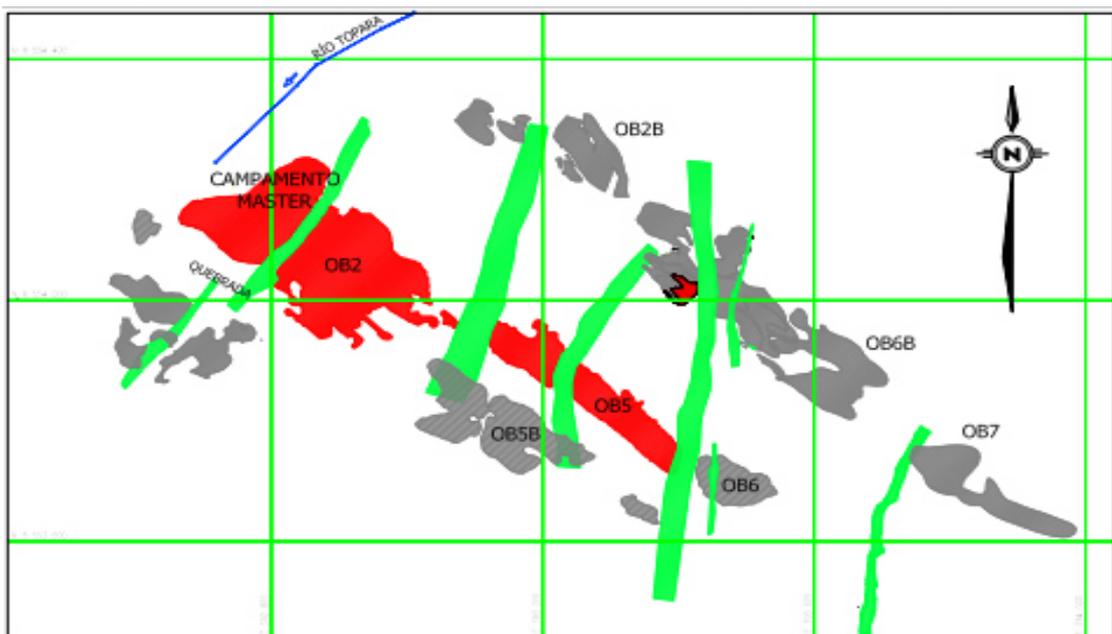


Figura 2. Detalle de cuerpos mineralizados, en planta. Tomada del Departamento de Geología

2.3.4. Geología estructural

Fallas

Se modelaron las fallas con el software “*Leapfrog Mining 2.6*”, usando la siguiente data:

- Geología y mineralización de sólidos

- Topografía de la superficie
- Polilíneas de todos los niveles (Figura 3)
- Planos de planta (como imágenes)
- Datos de taladros geotécnicos (Figura 4)

Se crearon discos orientados (coloreados por la orientación de azimut) para representar a cada superficie de falla en los niveles 1680, 1710 y 1740 tanto para la data de Milpo como el de SVS (Figura 5).

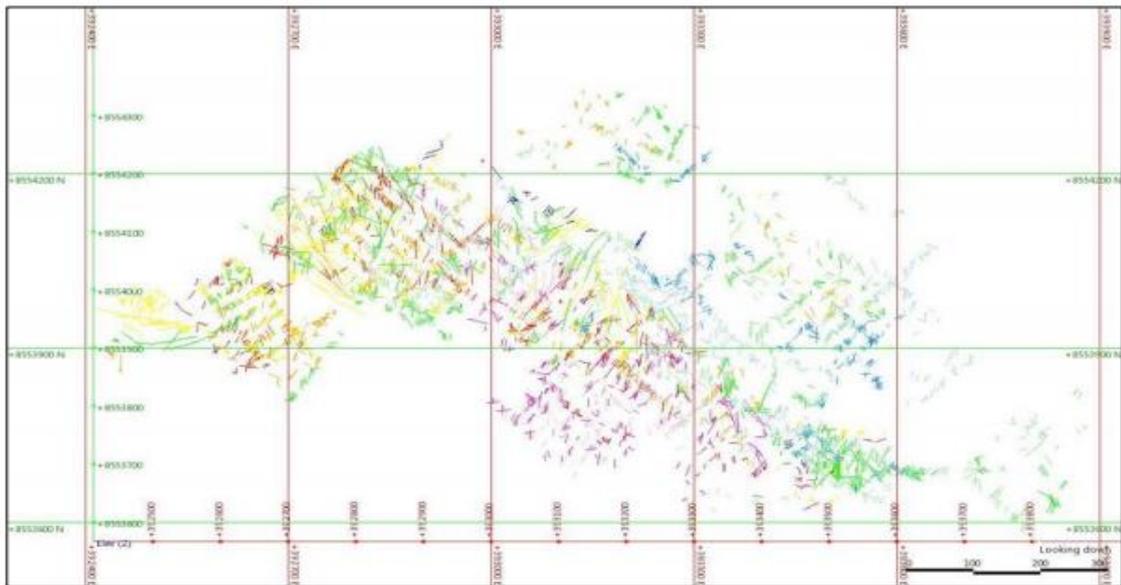


Figura 3. Polilíneas de las fallas (Milpo) para cada nivel en Leapfrog. Tomada del Departamento de Geología

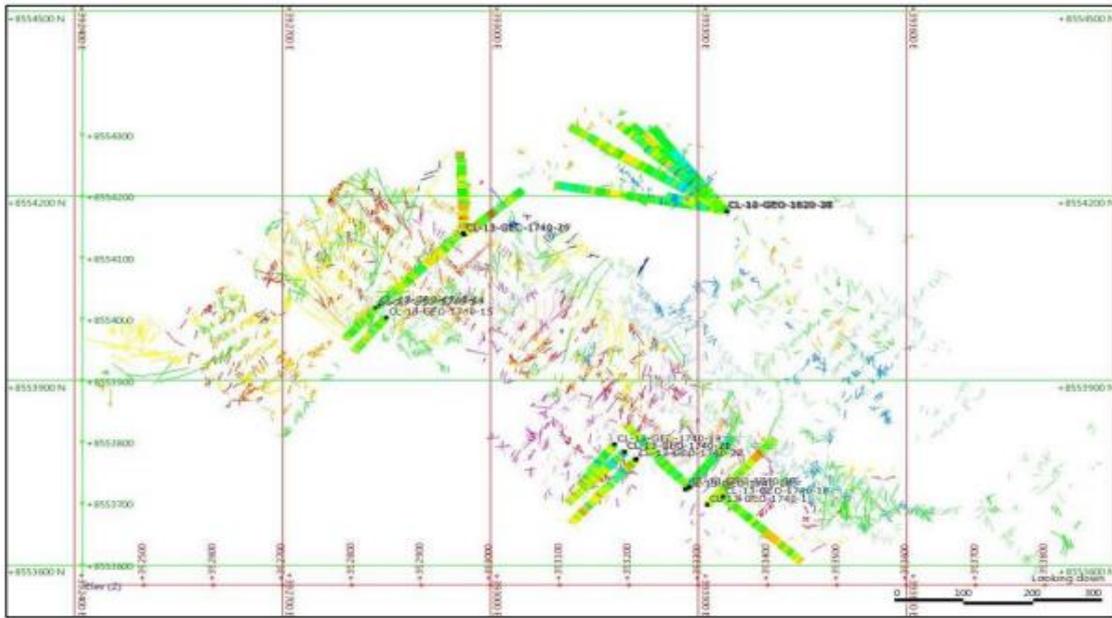


Figura 4. Data de taladros geotécnicos (Milpo) en Leapfrog. Tomada del Departamento de Geología

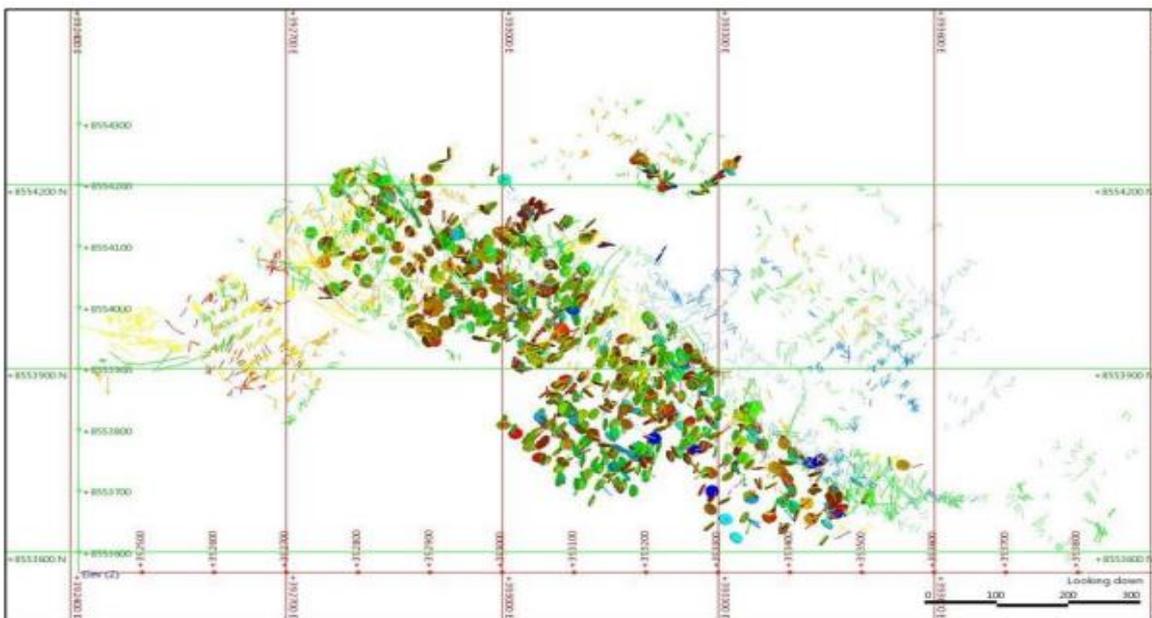


Figura 5. Discos orientados para representar las superficies de las fallas registradas (data SVS y Milpo) en Leapfrog. Tomada del Departamento de Geología

Las superficies de fallas fueron interpretadas a través de la vinculación de los afloramientos de falla con rumbos y buzamientos similares de nivel a nivel (Figura 6). Las superficies de falla modeladas representan una tendencia definida (azimut y buzamiento) del fallamiento presente en ese lugar en particular. Ellas no representan necesariamente una sola superficie de falla continua. En conclusión, el modelamiento 3D de las superficies de falla indica

que las principales orientaciones de fallas en Cerro Lindo en OB2 y OB5 que se muestran en la Figura 6 son:

- Alineamiento Norte – Sur: movimiento principalmente con deslizamiento en la inclinación y oblicuo (50 registros modelados en color naranja), estos son paralelos a las fallas históricamente interpretadas en el OB1.
- Alineamiento Noreste: movimiento principalmente con deslizamiento en el rumbo (39 registros modelados en color verde), estos son paralelos a la falla históricamente delimitada llamada Falla 60 entre OB2 y OB5 y también al conjunto de fallas del valle del río Topará.
- Alineamiento Noroeste - movimiento principalmente con deslizamiento en la inclinación (31 registros modelados en color azul), estos son paralelos a las fallas históricamente delineadas llamadas Falla 35 y Falla 75.
- Alineamiento Este - Oeste - (9 registros modelados en color púrpura), estas fallas no han sido históricamente delineadas.

El modelo estructural 3D es un modelo de trabajo que debe ser continuamente verificado y modificado en el tiempo (en el archivo digital se hace entrega de los archivos editables del presente modelo).

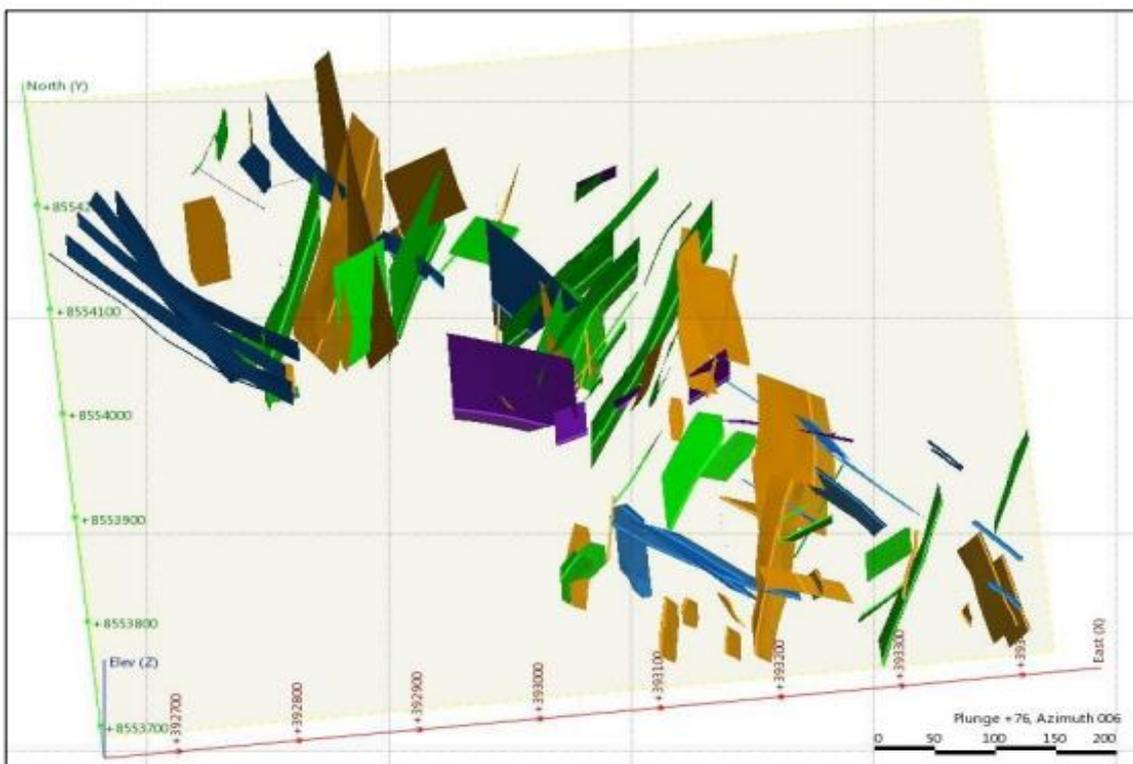


Figura 6. Modelo 3D de superficie de falla en los cuerpos OB2 y OB5. Tomada del Departamento de Geología

Discontinuidades

Se registraron las características de las discontinuidades, tales como: las familias de las juntas con su orientación y espaciamiento, tamaño de bloques, RQD, ondulamiento y rugosidad de las paredes, separación o abertura, relleno, continuidad y meteorización. Estas características fueron utilizadas en la clasificación geomecánica de los macizos rocosos y estimación de la resistencia al esfuerzo cortante.

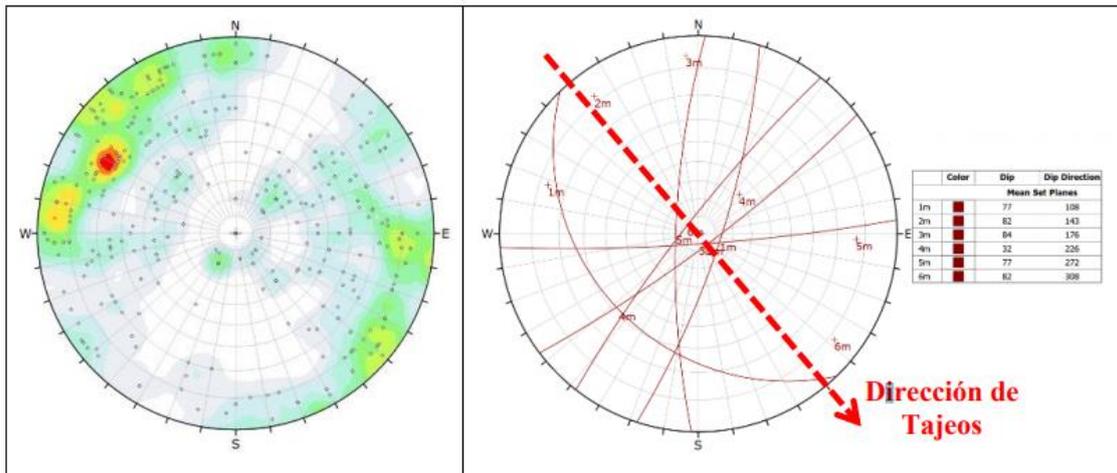


Figura 7. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el SPP y SPB del cuerpo OB2. Tomada del Departamento de Geología

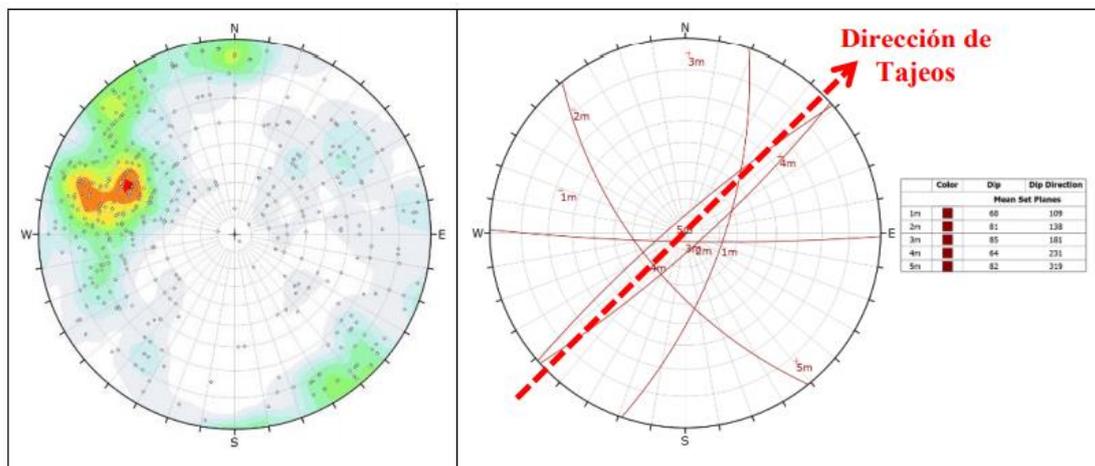


Figura 8. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el SPP y SPB del cuerpo OB5. Tomada del Departamento de Geología

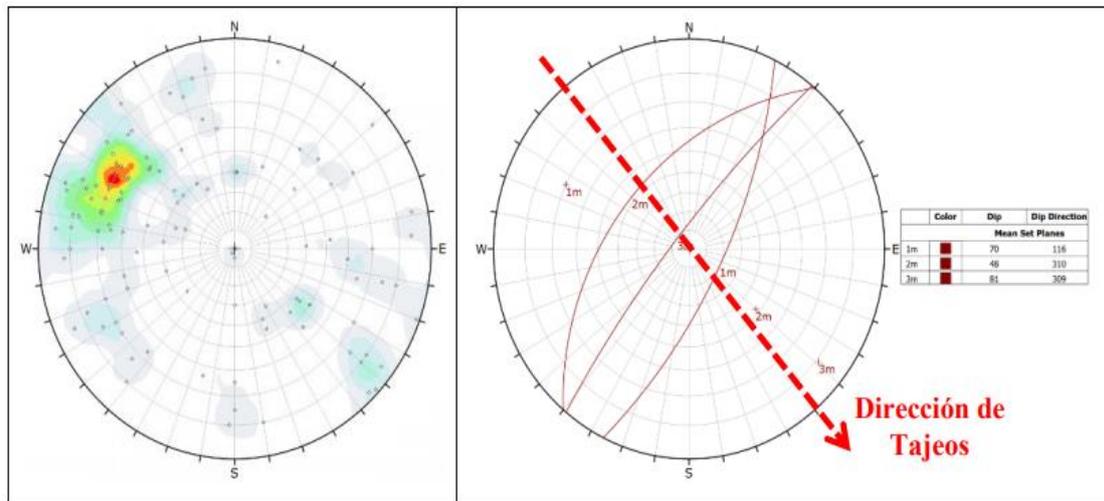


Figura 9. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el volcánico del cuerpo OB2. Tomada del Departamento de Geología

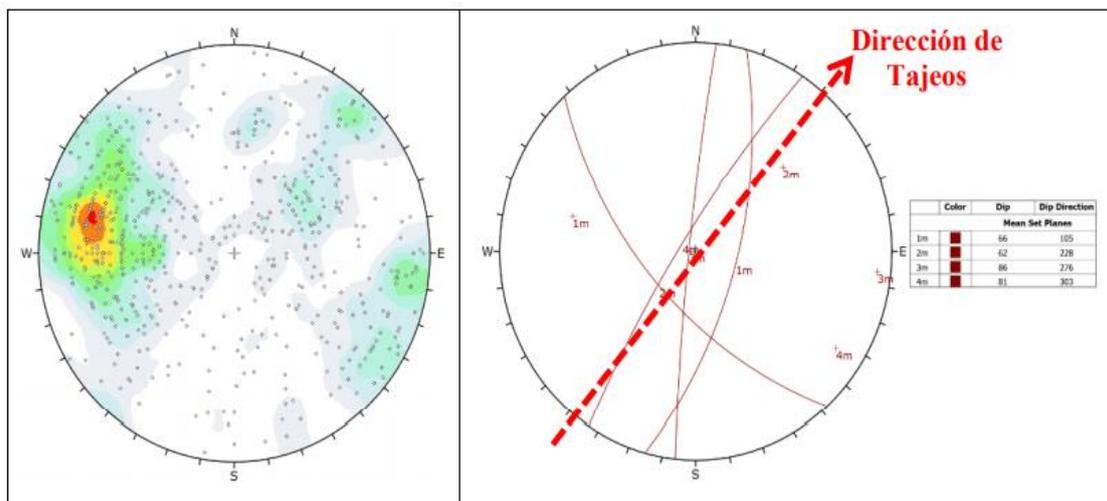


Figura 10. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el volcánico del cuerpo OB5. Tomada del Departamento de Geología

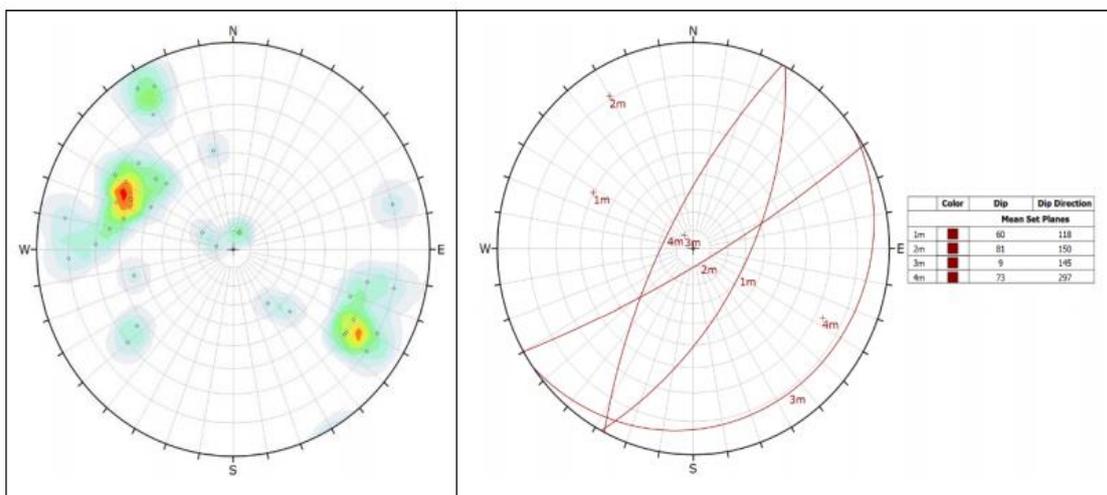


Figura 11. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el dique del cuerpo OB2. Tomada del Departamento de Geología

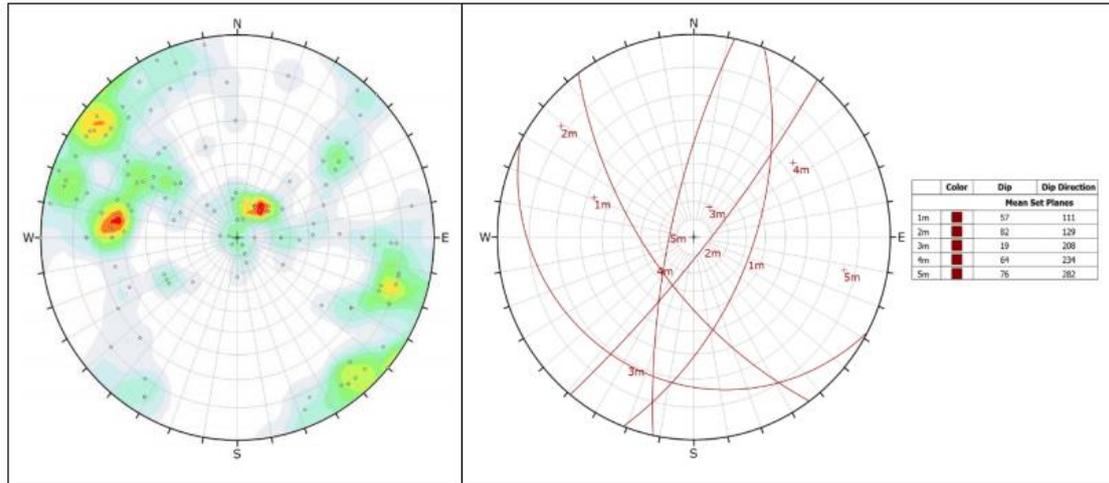


Figura 12. Estereograma de concentración de polos de las discontinuidades medidas en el dique del cuerpo OB5. Tomada del Departamento de Geología

Para agrupar las discontinuidades en familias se utilizó el programa *Dips* de *Rocscience*, adicionalmente se realizó un análisis a escala global de las características físicas de los sistemas predominantes por medio de líneas de detalle y los mapeos geomecánicos, siendo estos los siguientes:

Tabla 3. Características físicas de los sistemas de familias predominantes en el OB2

Litol ogía	Fam	Bu z	Direc. Buz	Persis	Espac. Prom. (m)	Tipo Discont.	Abertura	Tipo de relleno	Tipo de rugosidad	Forma
SPP / SPB	F-1	77	108	> 10 m	0.20 – 0.40	Tensión	1 - 5 mm	Limo, py	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-3	84	176	< 10 m	0.10 – 0.20	Tensión, Corte	< 2mm	Limo, py	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-5	77	172	< 10 m	0.1 – 0.30	Tensión	1 mm	Ox,	Medianamen te Rugosa.	Plana
VOL	F-1	70	116	> 10 m	0.20 – 0.40	Tensión	1 - 5 mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-2	48	310	< 10 m	0.15 – 0.30	Tensión	< 2mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-3	81	309	< 10 m	0.1 – 0.30	Tensión	1 mm	Ca	Medianamen te Rugosa.	Plana
DIQ	F-1	60	118	> 10 m	0.20 – 0.7	Tensión	< 1mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-2	81	150	< 10 m	0.25 – 0.50	Tensión	< 1mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-3	9	145	< 10 m	0.3 – 0.50	Tensión	< 1mm	Ca	Medianamen te Rugosa.	Plana

Tomada del Departamento de Geología

Los sistemas de discontinuidades en la zona mineralizada, conformados por una primera familia con orientación 68/109 paralelo al minado transversal, presentan una persistencia superior a los 10 m con espaciamiento que varían entre 0.2 y 0.45 m; la segunda familia con orientación 85/181 y espaciamiento

que varían entre 0.15 y 0.40 m con persistencia menor a 10 m y finalmente la familia 3 con orientación de 64/231, con espaciamiento entre 0.3 y 0.50 m y con menor persistencia menor a 5 m.

Tabla 4.

Características físicas de los sistemas de familias predominantes en el OB5

Litol ogía	Fam	Bu z	Direc. Buz	Persis	Espac. Prom. (m)	Tipo Discont.	Abertura	Tipo de relleno	Tipo de rugosidad	Forma
SPP / SPB	F-1	68	109	> 10 m	0.10 –0.30	Tensión	1 - 5 mm	Limo, py	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-2	85	181	< 10 m	0.15 –0.40	Tensión	< 2mm	Py, ox	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-3	64	231	< 10 m	0.3 – 0.50	Tensión	1 mm	Py, ox	Medianamen te Rugosa.	Plana
VOL	F-1	66	105	> 10 m	0.20 –0.45	Tensión	1 - 5 mm	Ca.	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-2	62	228	< 10 m	0.15 –0.40	Tensión	< 1mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-4	81	303	< 10 m	0.3 – 0.50	Tensión	1 mm	Ca	Medianamen te Rugosa.	Plana
DIQ	F-1	57	111	> 10 m	0.30 –0.60	Tensión	< 1mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-3	19	208	< 10 m	0.20 –0.40	Tensión	< 1mm	Ca	Ligeramente Rugosa	Plana
	F-4	64	234	< 10 m	0.3 – 0.50	Tensión	< 1mm	Ca	Medianamen te Rugosa.	Plana

Tomada del Departamento de Geología

2.4. Macizo rocoso

Las propiedades de resistencia del macizo rocoso difieren de los de la roca intacta, debido a que el primero presenta discontinuidades como diaclasas, fisuras, fallas, etc. que influyen en su comportamiento, pero en las que es prácticamente imposible ejecutar ensayos de corte o de compresión triaxial a una escala apropiada.

Por esta razón, se han definido criterios de falla del macizo rocoso a partir de los índices de clasificación, siendo uno de ellos el criterio propuesto por Hoek & Brown (1988), actualizado, luego, en 2002. (5)

2.4.1. Roca intacta

Las propiedades de la roca intacta consideran aquellas que definen a las rocas sin discontinuidades presentes. Para definir las propiedades de la roca intacta, se han considerado los resultados de los ensayos de mecánica de rocas disponibles a la fecha de este reporte. Asimismo, se ha añadido la información colectada el año 2016. Debido a que no se cuenta con suficientes ensayos de laboratorio de propiedades elásticas para las litologías consideradas en el

presente estudio, se decidió utilizar la correlación para la obtención del módulo de Young (6) a partir de los valores de resistencia a la compresión simple (ver Figura 13).

La Tabla 5 muestra los valores representativos de densidad, resistencia a la compresión uniaxial (UCS), resistencia a la tracción (σ_t), constante m del criterio de resistencia de Hoek y Brown, módulo de Young (E_i correlacionado) y el módulo de Poisson (ν_i). (6)

Para los materiales tipo suelo solo se detalla el valor de la densidad *in situ* y de la resistencia a la compresión simple estimados.

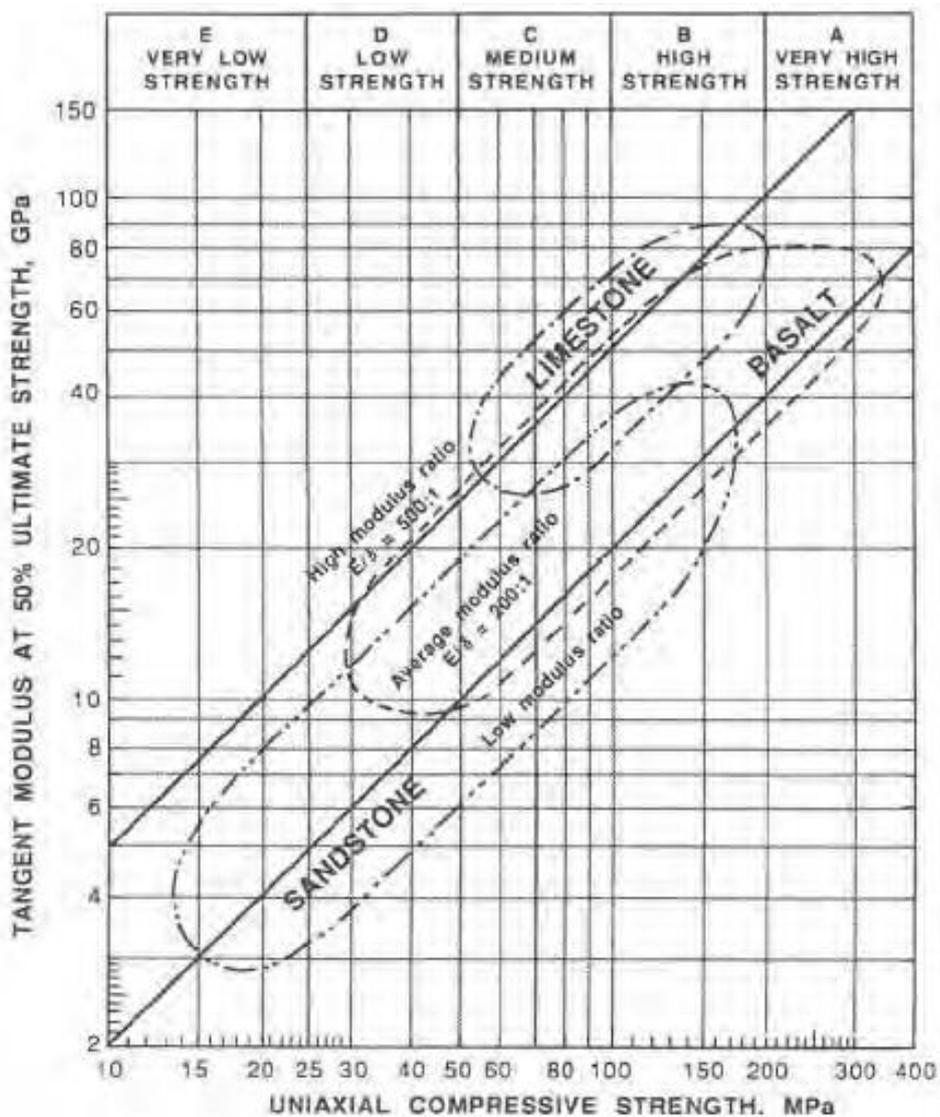


Figura 13. Valores de resistencia a la compresión simple

Tabla 5.**Valores representativos de densidad, UCS, σ_t y constante m_i del criterio de resistencia**

Unidad geotécnica	Densidad (gr/cm ³)	UCS (MPa)	σ_t (MPa)	m_i	E_i (GPa) ⁽²⁾	ν_i
SPP	4.56	47	3.4	17.3	23	0.23
SPB	4.49	69.2	1.8	18	34	0.34
SSM	3.2	86.6	8.7 ⁽¹⁾	15.4	45	0.39
Volcánico	2.91	154.5	11.8	38.2	80	0.23
Dique	2.79	190.3	18.6	50	60	0.15
Dique de baja resistencia	2.65 ⁽¹⁾	40 ⁽¹⁾	4 ⁽¹⁾	12 ⁽¹⁾	17 ⁽¹⁾	0.25 ⁽¹⁾
Enclave	2.65	67.2	6.7 ⁽¹⁾	12 ⁽¹⁾	32	0.25 ⁽¹⁾
SLB/SOB/ SOP	2.32	45.6	4.6 ⁽¹⁾	7 ⁽¹⁾	20	0.3 ⁽¹⁾
Coluvial	2.0 ⁽¹⁾	0.45 ⁽¹⁾	--	--	--	--
Fallas	2.3 ⁽¹⁾	0.55 ⁽¹⁾	--	--	--	--

⁽¹⁾ No hay ensayos de laboratorio disponibles, se están considerando valores basados en información bibliográfica y en la base de datos del RocData.

⁽²⁾ Valores obtenidos de la correlación de Deere y Miller (1966)

Tomada del Departamento de Geología

2.4.2. Índice RQD

El índice de designación de la calidad de la roca RQD (6) provee un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa a partir de la medición de los trozos testigos de perforaciones diamantinas con fracturas naturales y como un cálculo volumétrico a partir de la frecuencia de fracturas naturales en las estaciones geomecánicas.

El análisis estadístico del RQD fue realizado para cada unidad litológica por separado con la finalidad de apreciar el fracturamiento que presentan. Los gráficos estadísticos presentados a continuación corresponden a cálculos hechos a partir de los logueos geomecánicos y verificación fotográfica de aquellos tramos de los taladros cortados para muestreo. (6)

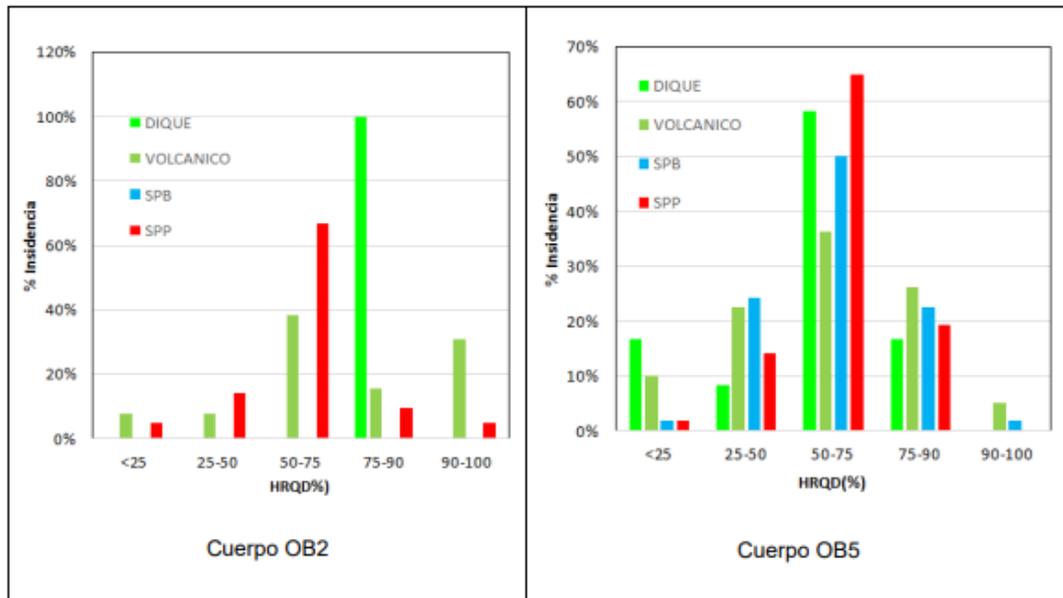


Figura 14. Comportamiento del RQD para el OB2 y OB5. Tomada del Departamento de Geología

En la práctica, un alto valor de RQD no siempre se traduce en una alta calidad de roca. Es posible loguear 1.5 metros de arcilla, y se puede describir 100% RQD. Esto puede ser verdadero en la definición original de RQD, pero es muy engañoso y da la impresión de una roca competente. Para evitar este problema, se recomienda utilizar un parámetro llamando *Handled* RQD (HRQD) o RQD de manipuleo. (7) El HRQD se mide de la misma manera que el RQD, después de que el testigo ha sido firmemente manipulado en un intento de romper el testigo en fragmentos más pequeños. Durante el manipuleo el testigo se gira y dobla firmemente, pero sin el uso de una fuerza substancial ni de ninguna herramienta. En el caso de Cerro Lindo, se aplicó este principio para las rocas SPP y SPB en el que aparentemente presentan índices de fracturamiento alto, debido a que en los mapeos geomecánicos se aprecian bloques de considerables tamaños y en los logueos se tiene una máxima recuperación donde el RQD medido como tal está en el orden de 75% a 100%; con estas consideraciones y los tipos de rocas en cuestión se determinó el HRQD en remplazo del RQD, que varía entre el 25% a 75% para el cuerpo mineralizado (SPP y SPB), 50% y 90% para la roca encajonante (VOL) y entre el 50 y 100% para el dique.

2.4.3. Clasificación geomecánica

Para la clasificación geomecánica de las diferentes litologías se utilizaron los sistemas de clasificación RMR76 y RMR89 de Bieniawski (1976, 1989), Q de Barton (1973) y como complemento, el Índice de Resistencia Geológica GSI (1994).

Un enfoque comúnmente usado en los sistemas de clasificación para aplicaciones mineras es el de simplificar estos sistemas de clasificación para incluir solo factores dependientes del macizo rocoso e ignorar las condiciones externas del entorno, como son los esfuerzos y la orientación de la excavación.

El índice resultante solo dependerá del macizo rocoso y dará la misma evaluación para las condiciones similares de roca a diferentes profundidades y diferentes orientaciones de galerías dentro de la mina. Este enfoque simplificado de clasificación ha sido aplicado a ambos sistemas RMR y Q, y el resultado se conoce como el RMR' y el Q'.

- **Sistema de clasificación RMR76**

El sistema de clasificación RMR89 (cuya versión anterior fue el RMR76) fue desarrollado por Bieniawski. (8)

El sistema considera seis parámetros de clasificación (ver Tablas 6 y 7). La suma de estos parámetros da el índice RMR. Para el caso minero, se recomienda no considerar la valoración por ajuste de orientación y considerar las condiciones de agua como secas. El resultado es conocido como RMR'.

La valoración de los parámetros que intervienen en la clasificación de macizo rocoso fue

Obtenida de los logueos geomecánicos, ensayos de mecánica de rocas y mapeos subterráneos.

Tabla 6.
Parámetros de clasificación

Parámetros de Clasificación	Rango de valores
Resistencia Uniaxial de la roca intacta	0 – 15
Rock Quality Designation (RQD)	3 – 20
Espaciamiento de discontinuidades	5 – 30
Condición de las discontinuidades	0 – 25
Condiciones hidrogeológicas, agua subterránea	0 – 10
(*) Ajuste por orientación de discontinuidades	(-12) – 0

(*): No se considera la valoración para Minería

Tomada del Departamento de Geomecánica

Parámetros de clasificación del sistema RMR.

Tabla 7.
Clases de macizo rocoso y sus índices RMR

Parámetros de clasificación	Rango de valores
Resistencia uniaxial de la roca intacta	0 – 15
Rock Quality Designation (RQD)	5 – 20
Espaciamiento de discontinuidades	5 – 30
Condición de las discontinuidades	0 – 25
(*) Condiciones hidrogeológicas, agua subterránea	0 – 10
(**) Ajuste por orientación de discontinuidades	(-12) – 0

(*): Se considera como 10 para el RMR'

(**): Se considera como 0 para el RMR'

Tomada del Departamento de Geomecánica

- **Clasificación geomecánica del SPP**

Del análisis estadístico del RQD para el SPP se obtuvo que el RQD presenta una mayor incidencia entre 90% a 100%, sin embargo, el promedio ponderado del RQD es 66% debido a que presenta la tercera mayor concentración entre 0% a 10% (roca muy mala).

De la descripción geotécnica para este tipo de roca se determinó la presencia SPP grano fino y SPP grano grueso siendo este último un material deleznable con cero RQD.



Figura 15. SPP: grano medio a grueso

- **Clasificación geomecánica del SPB**

De la misma manera para el SPB se obtuvo que el RQD presenta una mayor incidencia entre 90% a 100%, siendo el promedio ponderado del RQD de 80%. De igual forma se determinó que el SPB de grano fino presenta mayor competencia y SPB de grano grueso es de menor competencia (material deleznable).



Figura 16. SPB: grano grueso a medio

- **Clasificación geomecánica del volcánico cercano**

Según el relagueo efectuado en el sondaje CL13-1740-09, se pudo determinar que la roca caja cercana al mineral se encuentra fracturada y que a menudo está asociada a zonas de debilidad (fallas) por lo que la calidad de la

roca tiende a disminuir. En dicho tramo se ha estimado una resistencia a la roca intacta que varía entre 50 a 100 MPa, el índice RQD varía entre 40% a 60% por lo que se obtiene un RMR que varía entre 30 a 45. En la Figura 17 se aprecia la roca encajonante cercana y fracturada, asociada a las fallas.

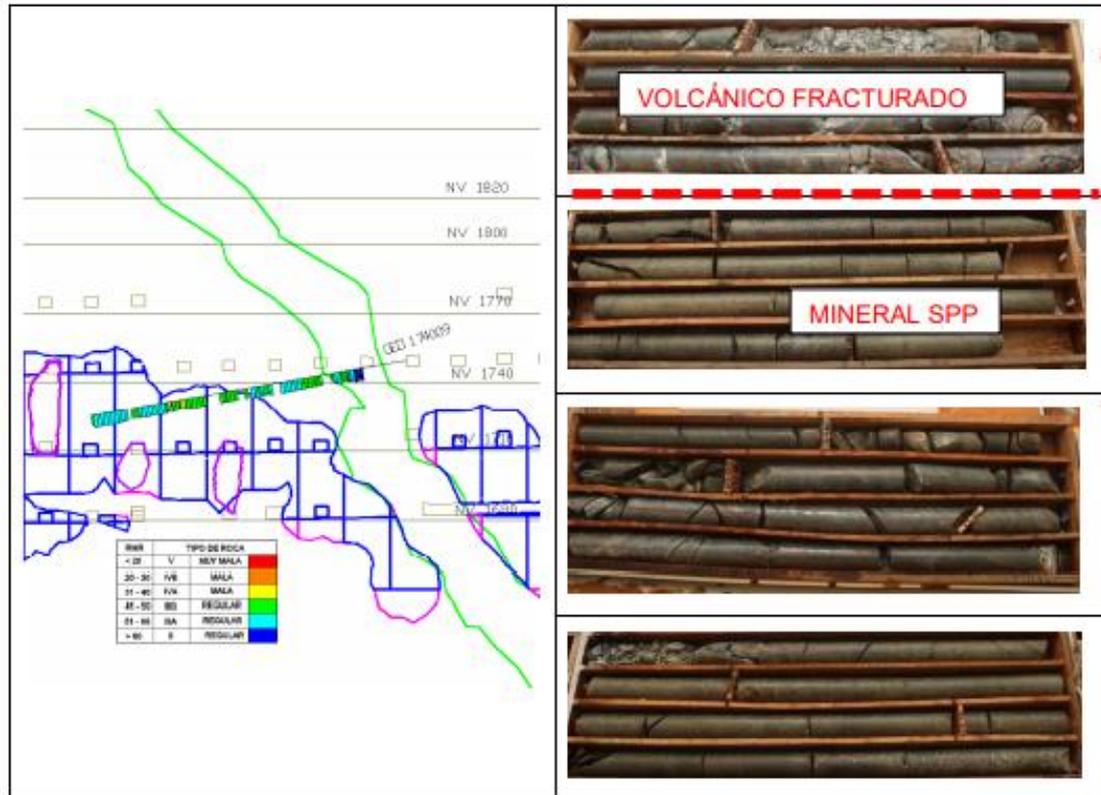


Figura 17. Contacto caja techo volcánico – mineral

Según el relagueo realizado en el sondaje CL13 GEO1740 -16, se determinó que la roca caja cercana al mineral es un volcánico con mineral diseminado o bien llamado zona de transición de cambio litológico, en dicho tramo se ha estimado una resistencia que varía entre los 50 a 100 MPa, el índice RQD varía 75% a 90%, por lo que el índice de RMR de la roca varía entre 50% a 55%.

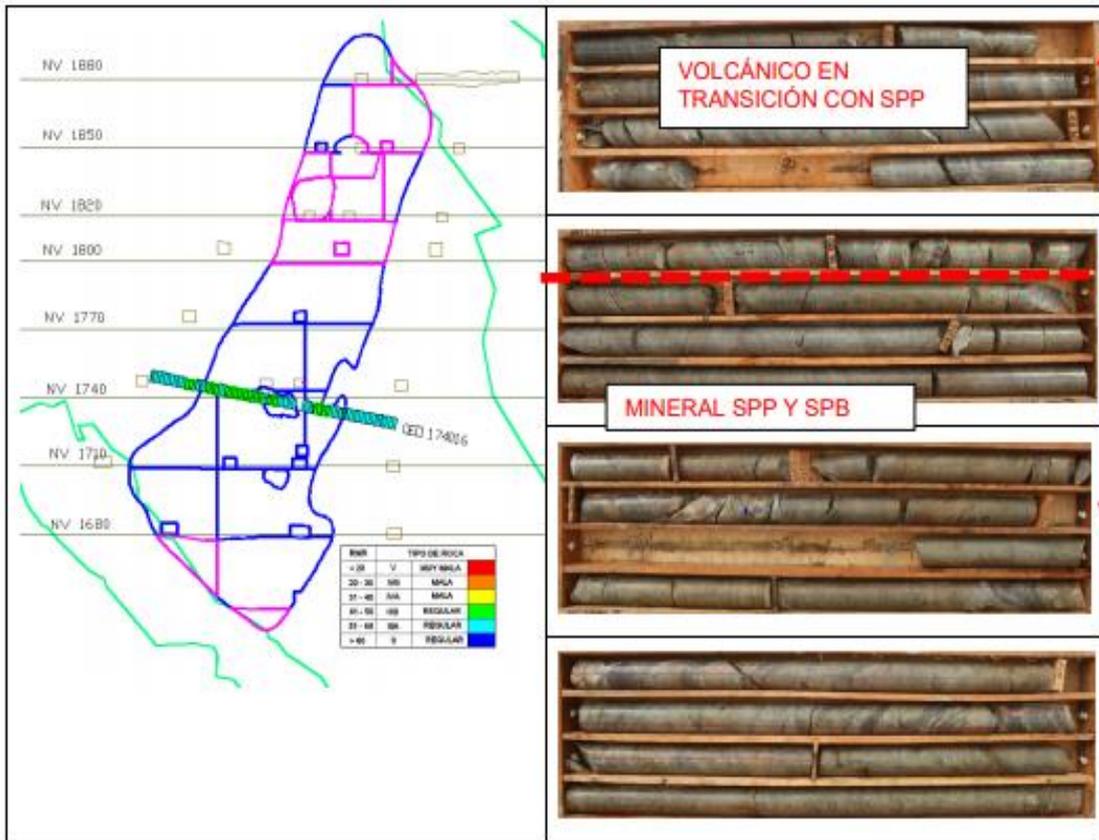


Figura 18. Caja techo cercana – transición volcánica – SPP

- **Clasificación geomecánica del dique**

De acuerdo a las investigaciones geotécnicas realizadas para el dique, tanto en las labores subterráneas como en el relagueo de testigos diamantinos, se ha podido determinar que la resistencia a la compresión simple de la roca intacta es superior a los 200 MPa, con RQD varía entre 40% a 80%, debido a que presentan zonas de fracturamiento alto asociadas a fallas, en los mapeos se ha observado que la roca es competente, en cambio, en los taladros se ha determinado la existencia de zonas con calidad inferior.

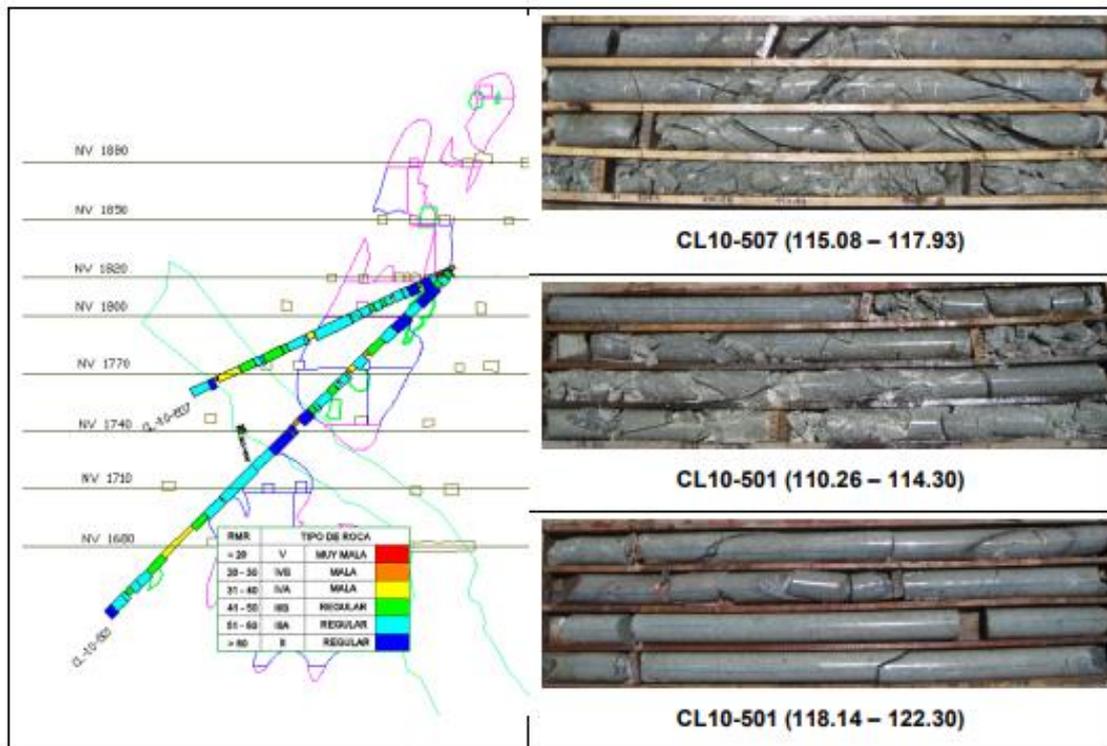


Figura 19. Dominio geotécnico del dique; sondajes CL10 507 y CL10 501

Con los datos de RMR se confeccionaron Planos de Isovalores de RMR en planta por cada nivel caracterizado, permitiendo visualizar la variación de RMR a lo largo de todo el cuerpo mineralizado incluida la roca encajonante cercana al mineral y los diques. Los planos 8, 9 y 10 presentan vistas del valor de RMR proyectado en planos en planta por nivel; en estas vistas longitudinales también puede apreciarse que la clase de roca predominante para el cuerpo mineralizado es la del tipo III (RMR 40 – 60); para la roca caja cercana es del tipo III (RMR 40 – 60), con una tendencia a mejorar en la parte de la roca encajonante lejana (RMR 50 – 60). Para el dique la roca predominante es del tipo (RMR 60 - 80).

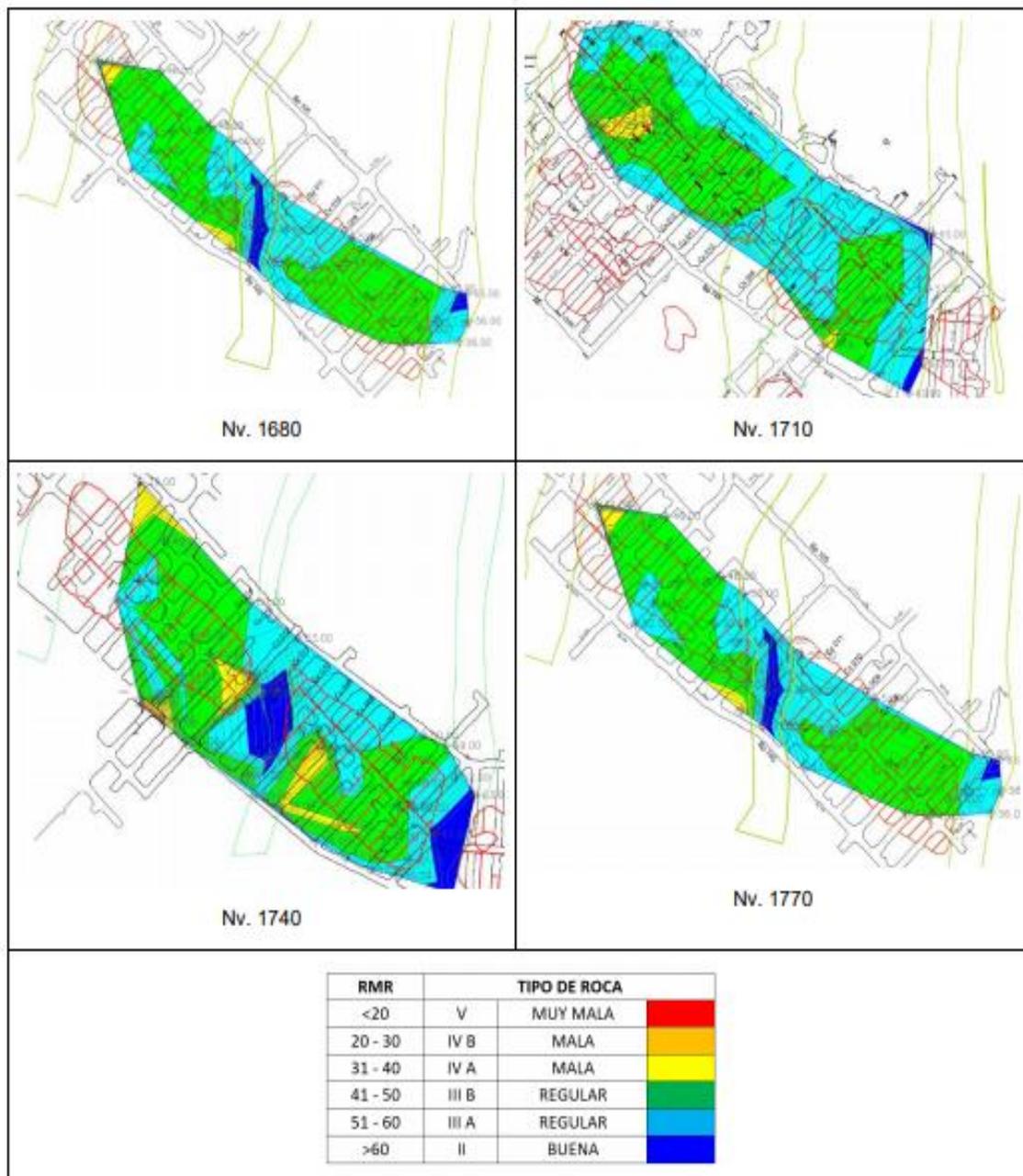


Figura 20. Isovalores de RMR – OB5 para los niveles: 1680, 1710, 1740 y 1770. Tomada del Departamento de geomecánica

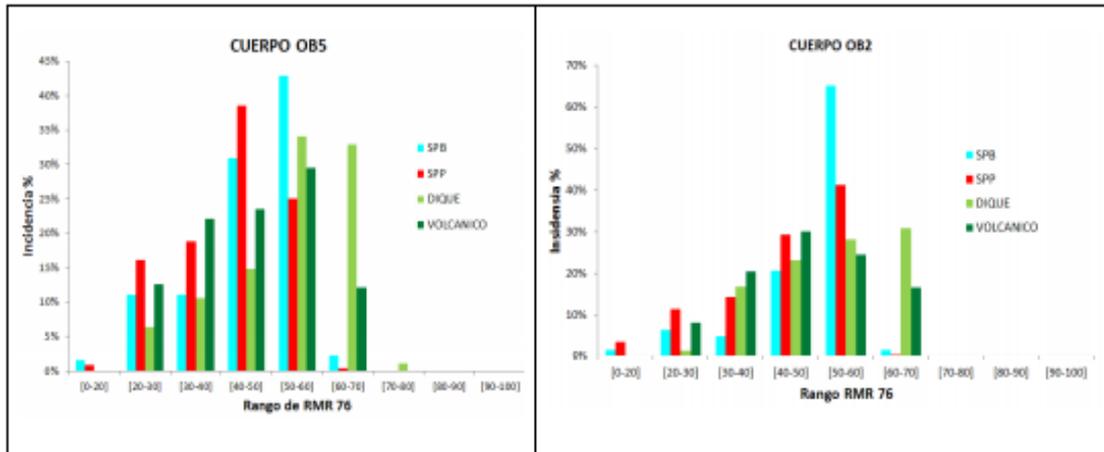


Figura 21. Análisis estadístico de los valores de RMR para los cuerpos OB5 Y OB2 respectivamente. Tomada del Departamento de Geomecánica

Tabla 8. Variabilidad de la clasificación geomecánica RMR en los cuerpos OB2 y OB5

Dominio Litológico	OB2			OB5		
	RMR min.	RMR máx.	RMR 76 Prom.	RMR min.	RMR máx.	RMR 76 Prom.
SPP/SPB	15	61	50	16	63	50
VOL CERCANO	17	55	46	22	55	46
VOL LEJANO	35	70	54	35	70	54
DIQUE	17	69	55	24	74	56

2.4.4. Propiedades de resistencia y elásticas del macizo rocoso

El cálculo de las propiedades para los distintos materiales considerados en el modelo numérico se describe en el capítulo del reporte. La resistencia del macizo fue estimada según el criterio empírico de Hoek-Brown a partir de las propiedades de la roca intacta y del índice GSI. (5)

Este criterio considera una envolvente de falla no lineal, donde la cohesión y el ángulo de fricción equivalente del material varían según el nivel de confinamiento, el que puede variar de muy alto a prácticamente cero en distintas etapas de la secuencia. La envolvente es descrita por los parámetros “ σ_{ci} ” “ m_i ”, “ s ” y “ a ”.

La variable m_i de la fórmula anterior es la constante de la roca intacta, la cual fue estimada mediante los ensayos de compresión triaxial realizados en el laboratorio.

D es un factor de daño que depende del grado de alteración al cual el macizo rocoso está sujeto al daño por efecto de la voladura y relajación de presiones. Este factor varía de 0 para macizos rocosos *in situ* no alterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados. Para el caso de Cerro Lindo se utilizó $D=0$.

Dado que muchos de los programas geotécnicos utilizan los parámetros del criterio de falla de Mohr-Coulomb; se han calculado los valores de la cohesión y ángulo de fricción del macizo rocoso siguiendo la metodología propuesta por Hoek, (5) la misma que relaciona los valores del esfuerzo normal y de corte con los esfuerzos principales. Estos parámetros fueron determinados con el programa *Rocdata* de *Rocscience*.

El módulo de deformación *in situ* del macizo rocoso es un importante parámetro para el análisis numérico y la interpretación del monitoreo de deformación alrededor de las aberturas subterráneas. Estos parámetros son muy difíciles y caros para determinarlos en el campo, Bieniawski, Serafín y Pereira (1983), Grimstad y Barton (1993) y otros han establecido diferentes correlaciones del módulo de elasticidad con la calidad del macizo rocoso, que son resumidos en la siguiente figura (8):

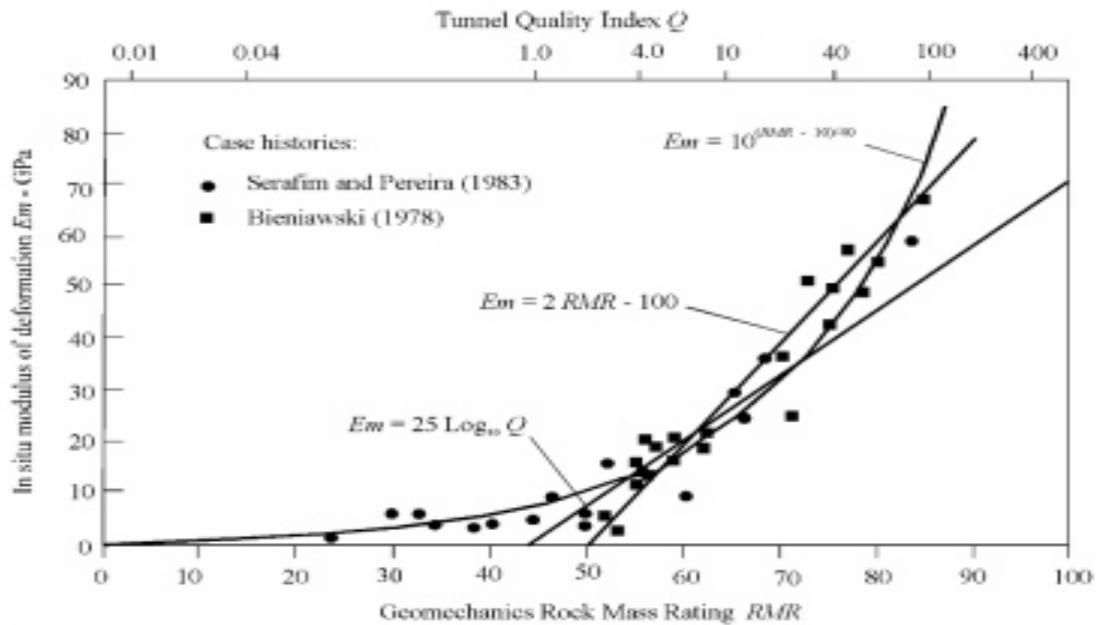


Figura 22. Estimación de las propiedades elásticas del macizo rocoso. Tomada del Departamento de Geomecánica

Tabla 9.

Parámetros de resistencia del macizo rocoso para el OB5

Dominio Estructural	mi	Densidad (KN/m3)	σ_c (MPa)	GSI	Macizo rocoso									
					σ_c global MR (MPa)	Hoek-Brown			Mohr Coulomb (sig3max = 2MPa)		Mohr Coulomb (sig3max = 8MPa)		Propiedades Elásticas	
						m_b	s	a	C (MPa)	Phi (°)	C (MPa)	Phi (°)	Em* (MPa)	ν
Mineral	18	45.40	50	50	11.569	3.018	0.0039	0.506	0.896	50.59	2.206	39.35	15000	0.30
Caja T. Cercana	24	27.4	80	46	19.643	3.489	0.025	0.505	1.041	55.25	2.622	44.56	12000	0.24
Caja T. Lejana	28	27.4	138	55	43.846	5.613	0.0067	0.504	1.645	61.96	3.735	52.71	20000	0.24
Dique	27	27.3	205	60	70.785	6.471	0.0117	0.503	2.439	64.69	4.735	56.53	25000	0.22

*: Este parámetro fue estimado con el Retro-análisis de los Tajeos Fallados y Bibliografía Especializada.

Tomada del Departamento de Geomecánica

2.4.5. Condiciones de esfuerzos *in situ*

Las magnitudes de los esfuerzos iniciales fueron estimadas bajo el supuesto de que uno de los esfuerzos principales era vertical, mientras que los otros dos se encontraban en el plano horizontal con una orientación norte-sur para el esfuerzo principal mayor. El componente vertical de los esfuerzos fue estimado calculando el peso de la roca sobre un punto determinado:

$$\sigma_v = \rho * g * z$$

En la ecuación anterior, ρ es la densidad de la roca, g es la constante de aceleración de gravedad y z es la profundidad a la que el esfuerzo vertical está siendo calculado.

La magnitud de los esfuerzos horizontales se consideró mediante la razón de esfuerzos k , que se define como el cociente entre los esfuerzos horizontales y el esfuerzo vertical. Se puede asumir que el valor de k permanece constante en el espacio para una dirección específica. De este modo, una vez que se conoce el valor de k , es posible estimar los esfuerzos horizontales en cualquier punto del modelo en esa misma dirección, usando la siguiente relación:

$$\sigma_h = k * \sigma_v$$

Donde σ_h es la magnitud de esfuerzo horizontal, k corresponde a la razón de esfuerzos asumida en la dirección de σ_v , mientras que σ_v es la magnitud de esfuerzo vertical. Los valores de k usados se describen en la Sección 5.3, y fueron obtenidos luego de un proceso de calibración.

Ensayos *in situ* por Overcoring

Para cada ensayo de sobreperforado se efectuó una prueba biaxial, salvo en el tercer sitio en el cual por motivo de una voladura efectuada en la cercanía provocó que la celda de medición se dañara y no arroje resultados coherentes, para la determinación del módulo de elasticidad y la razón de Poisson de la roca correspondiente.

La ubicación de los ensayos es como se indica en la figura y tabla a continuación:

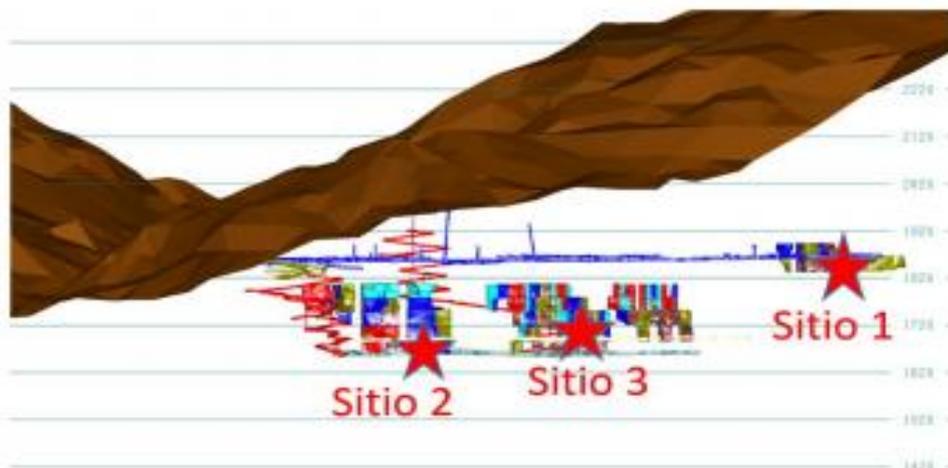


Figura 23. Ubicación de ensayos de esfuerzos *in situ* mediante overcoring. Tomada del Departamento de Geomecánica

Tabla 10.**Ubicación de ensayos de esfuerzos *in situ* mediante overcoring**

Sitio	Ubicación	OB	Tipo de Roca	Columna Litostática (m)	Azimut	Inclinación
1	Nivel 1850, galería 740 OB7	7	Sulfuro	350	210 °	3 °
2	Nivel 1650, crucero 029 OB2	2	Sulfuro	550	135 °	3 °
3	Nivel 1680, crucero 018 OB5	5	Sulfuro	520	45 °	3 °

Tomada del Departamento de Geomecánica

Los resultados obtenidos son los que se indican a continuación:

Tabla 11.**Resultados de los esfuerzos *in situ* mediante overcoring**

Sitio	Ensayo	Sigma 1 MPa	Azimut	Inclinación	Sigma 2 MPa	Azimut	Inclinación	Sigma 3 MPa	Azimut	Inclinación
1	1	27.95	32.7	2.0	11.75	299.7	56.3	8.84	124.0	33.7
	2	30.55	27.7	1.6	13.91	295.4	56.0	9.39	118.7	34.0
2	1	11.91	140.8	8.8	10.96	45.8	29.3	6.71	245.8	59.1
	2	13.02	323.1	16.8	10.76	61.0	24.3	6.93	201.8	59.8
3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	26.99	227.5	10.8	10.80	358.7	75.0	10.52	135.8	10.2

Tomada del Departamento de Geomecánica

Se observa que los resultados muestran resultados concordantes entre el sitio 1 y el sitio 3, probablemente a la cercanía entre estos; en el sitio 1 y 3 el esfuerzo principal vertical es el Sigma 2, en cambio en el sitio 2 se aprecia que el esfuerzo vertical es el sigma 3. Esto sugiere un cambio de orientación de esfuerzos a medida que nos acercamos más a la quebrada. Adicionalmente, se observa que los resultados en el sitio 2 presentan magnitudes considerablemente menores, el sitio 2 presenta una menor carga litostática entre los 3 sitios, a pesar de que la diferencia entre las cargas litostáticas de los tres sitios es 110 m. En la medida de lo posible será recomendable realizar ensayos de esfuerzos *in situ* en el OB2 para validar o descartar los resultados del sitio 2.

Como se verá más adelante, el análisis de la geología estructural realizado por SVS a partir de las fallas sugiere un probable cambio en la dirección de esfuerzos en el OB2, a medida que haya una aproximación a la quebrada.

Ensayos de esfuerzos por emisión acústica

La compañía minera Milpo solicitó a Matgeo S. A. (2014) la determinación de los niveles de esfuerzos *in situ* presente en dos sectores de la mina, mediante la técnica indirecta de emisión acústica. Los resultados provienen de un sondaje niv. 1740 Cx 008 OB5, en dos tramos; 62.92 - 69.40 (a 580 m de la superficie) y de 117.20 a 123.30 (a 640 m de la superficie). Los resultados de los ensayos de emisión acústica, realizados por Matgeo, son como se muestran a continuación:

Tabla 12.
Esfuerzos in situ a 60 m, mediante emisión acústica

a 60m	Stress (MPa)	Angulo Bearing (°)	Angulo de Plunge (°)
σ_1	41.78	317.8	27.83
σ_2	13.72	103.22	57.34
σ_3	-7.33	219.27	15.72

Tomada del Departamento de Geomecánica

Tabla 13.
Esfuerzos in situ a 120 m, mediante emisión acústica

a 120m	Stress (MPa)	Angulo Bearing (°)	Angulo de Plunge (°)
σ_1	49.09	320.62	5.91
σ_2	24.44	211.61	72.12
σ_3	19.32	53.02	17.02

Tomada del Departamento de Geomecánica

La medición de esfuerzos *in situ* mediante emisión acústica es una técnica no convencional e indirecta. Esto se basa en el “Efecto Kaiser” que consiste en que los materiales retienen en “memoria” las cargas aplicadas previamente. El análisis de este fenómeno supone un estado de esfuerzos máximos aplicados previamente que pueden ser detectados al aplicar una carga a un espécimen de roca hasta un punto donde se experimenta un incremento substancial en la actividad de emisión acústica

En cuanto a los resultados de los esfuerzos estos no se consideran confiables, debido a que ambos tramos de ensayos, está separado por solo 60 m de cota, y cuentan con un porcentaje considerable (mayor a 56%) de variación entre ambos tramos de ensayos.

Aspectos estructurales

Como parte del estudio geomecánico de la mina Cerro Lindo, SVS ha complementado un modelo estructural, que permitió estudiar y confirmar las orientaciones de los esfuerzos principales, los mismos que han sido calculados mediante el análisis cinemático de las fallas y estrías, a partir de la medición de los esfuerzos *in situ*, usando el "método indirecto de Emisión Acústica" (Matgeo) y los métodos "*Overcoring*" (Ingeroc). Las principales orientaciones de esfuerzo varían entre los diferentes métodos de cálculo y entre los lugares de recolección de datos. Después de la revisión y un análisis profundo de los datos de SVS se ha llegado a la conclusión de que los datos de Ingeroc son los más robustos. La orientación promedio del esfuerzo principal estimado a partir de análisis cinemático de las fallas y estrías, y la medición de esfuerzos *in situ* indica que hay dos orientaciones principales de los esfuerzos principales, uno en OB2 y otro en OB5.

En OB5, Sigma (σ) 1 es subhorizontal Noreste-Suroeste, σ 2 es subvertical y σ 3 es subhorizontal Sureste-Noroeste. Esto se corresponde con una veta extensional medida en OB5, con fibras de crecimiento perpendiculares a la pared de la veta.

En OB2, σ 1 es subhorizontal Noroeste-Sureste, σ 2 es subhorizontal Noreste-Suroeste y σ 3 es subvertical, ver Figura 24. En esencia existe una rotación alrededor del esfuerzo principal en los tres ejes orientados similarmente.

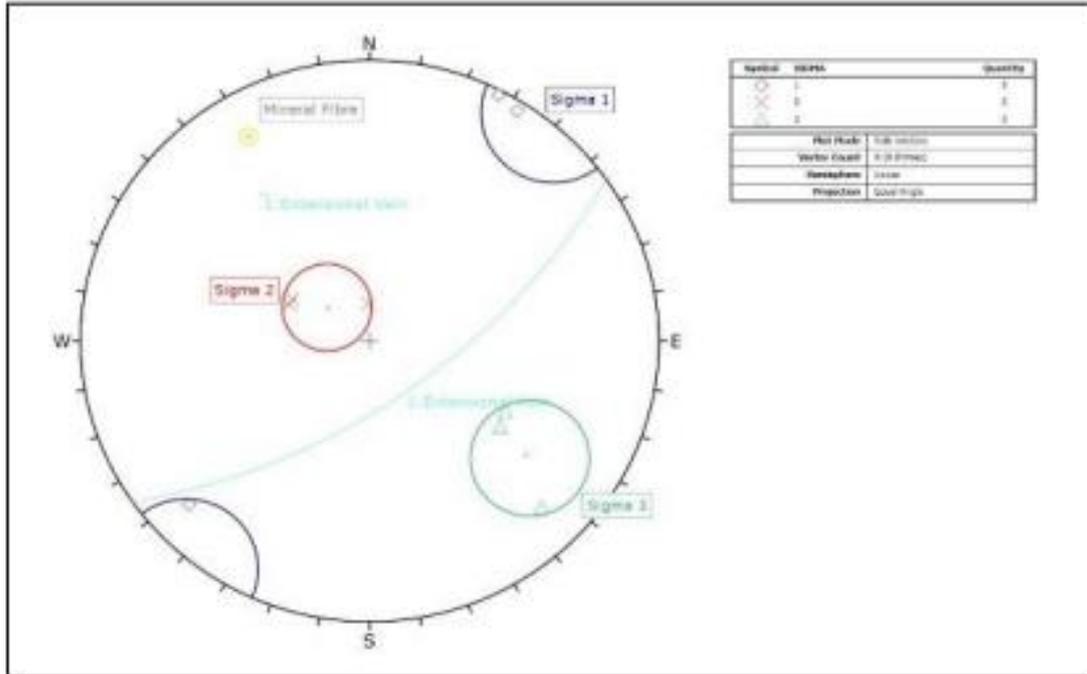


Figura 24. Orientaciones del esfuerzo principal - OB5. Tomada del Departamento de Geomecánica

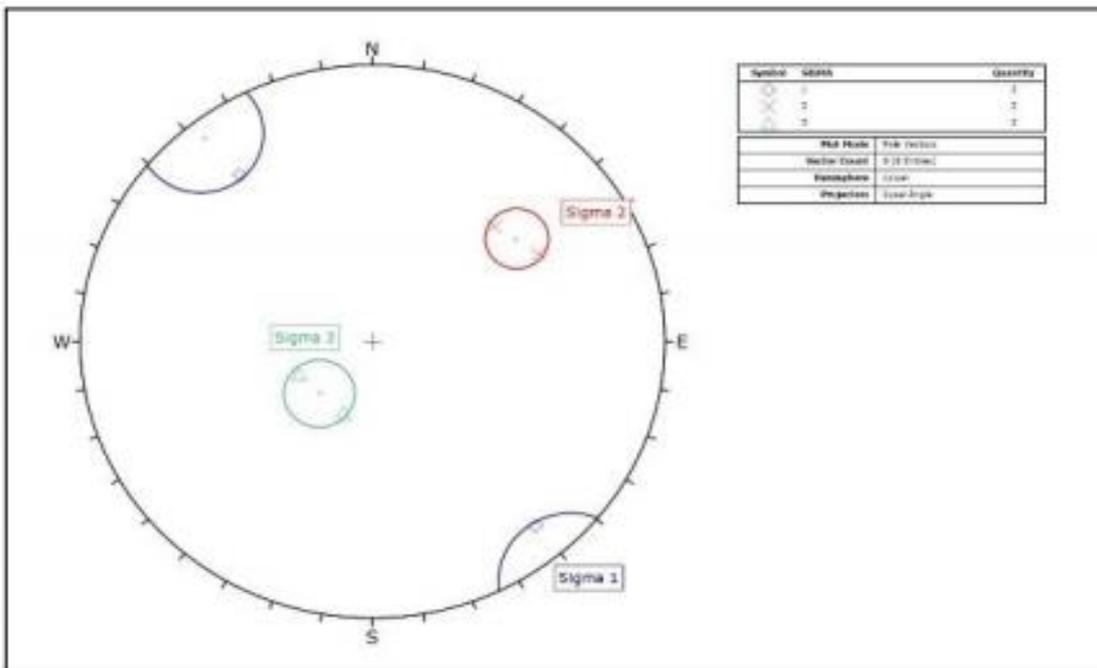


Figura 25. Orientaciones del esfuerzo principal - OB2. Tomada del Departamento de Geomecánica

En OB2 hay dos sistemas de fallas principales cercanos que podría crear patrones locales de esfuerzo, el conjunto de fallas mayor del valle del río Topará con rumbo Noreste-Suroeste y el conjunto de fallas de la Falla 35 situado entre OB2 y OB1. Debido a la topografía también existe una menor presión de

confinamiento en esta área lo que explicaría por qué σ_3 es subvertical en esta ubicación.

Los diques en la región son entendidos como una de las últimas características estructurales formadas. Sin embargo, en los testigos se observaron diques cortados transversalmente por vetas más jóvenes, que a su vez eran cortados transversalmente por fallamiento probablemente de ruptura frágil, cambio y ajuste de pequeña escala. Si los diques se formaron durante la extensión pura, es decir, no aprovecharon las estructuras anteriores, entonces ellos nos van a indicar las principales orientaciones de esfuerzo que estaban presentes durante su formación. Los diques con rumbo entre el Norte-Noroeste a Noreste, por lo tanto, indican esfuerzos principales de: σ_1 subhorizontal, NNE-SSO, σ_2 subvertical y σ_3 subhorizontal, ONO-ESE (ver Figura 26). Estas son orientaciones similares a las principales orientaciones de esfuerzo medidas por Ingeroc en OB5. No existe una respuesta clara en las estructuras en cuanto a la orientación de las principales orientaciones de esfuerzo en la actualidad y por qué existen dos orientaciones principales medidas por el método de overcoring realizado por Ingeroc.

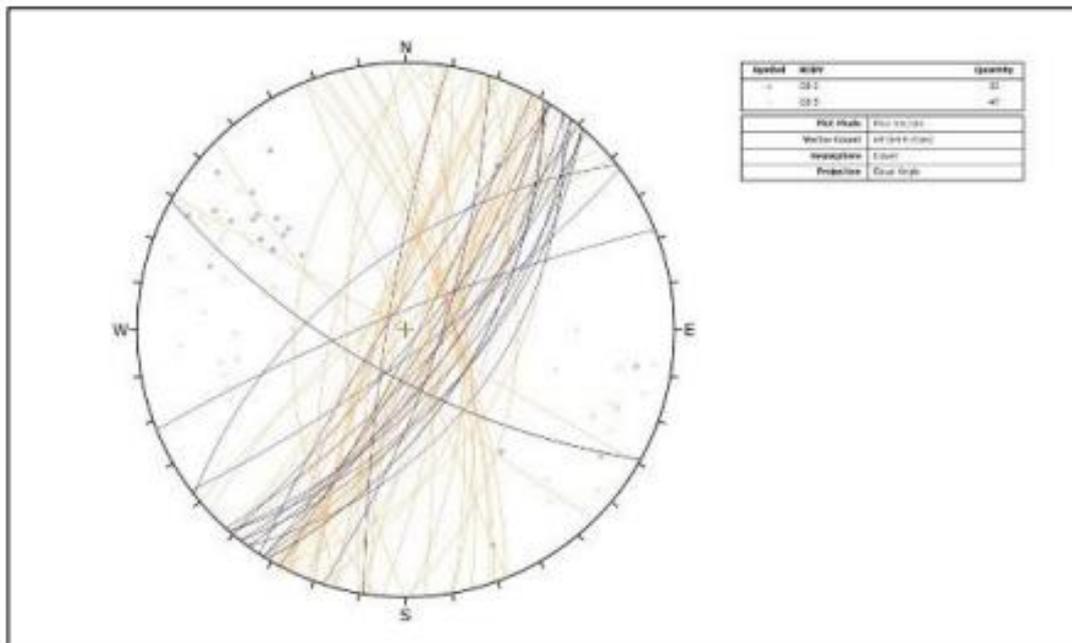


Figura 26. Contactos en los diques en OB5 (naranja) y OB2 (azul). Tomada del Departamento de Geomecánica

En este contexto se recomienda realizar más mediciones de esfuerzos a lo largo de la mina, por lo menos en cinco puntos distribuidos a diferentes profundidades, para que se confirme la orientación predominante y los efectos de la quebrada Topará.

2.5. Método de explotación

2.5.1. Sublevel stopping

El método de explotación subterránea es utilizado mayormente en los yacimientos de formas tabulares irregulares verticales o subverticales donde su espesor es de mayores a 10 metros en lo general. En lo ideal se desea que los contornos o bordes en los contactos del cuerpo mineralizado sea regular. Este método de explotación también es aplicable en yacimiento o cuerpos mineralizados de gran potencia, la roca debe ser competente. Este método de explotación masivo es no selectivo, por lo que excava el mineral por rebanadas verticales que deja un vacío que será rellenado con material tipo pasta.

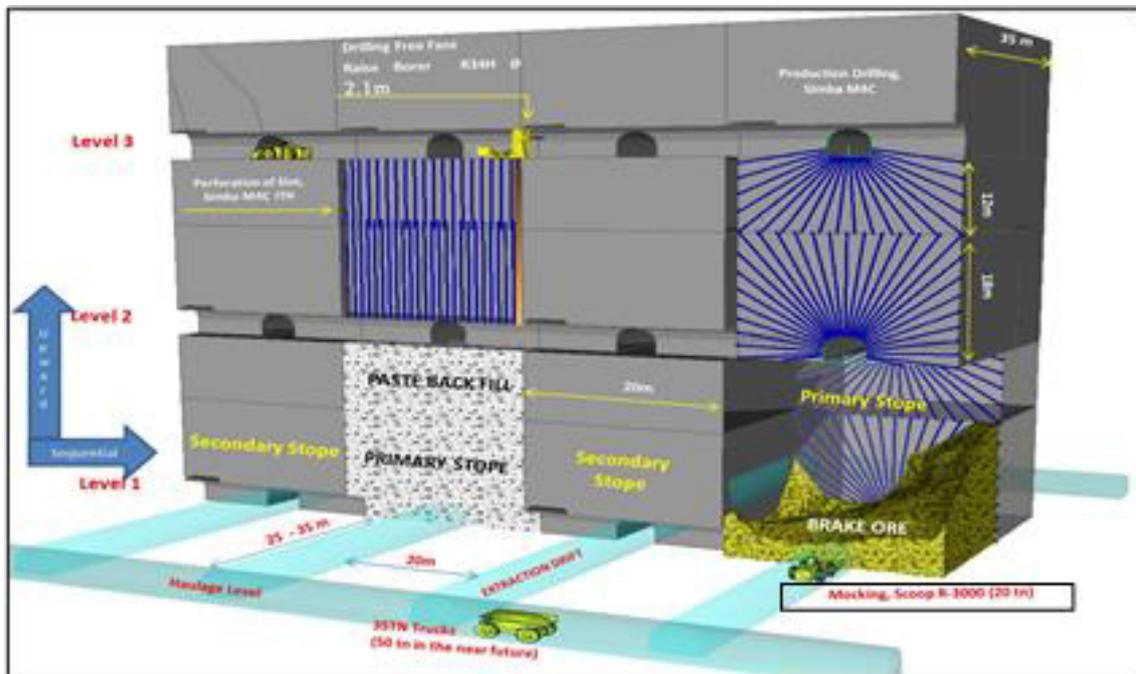


Figura 27. Isométrico del método de sublevel stopping en la unidad minera Cerro Lindo

2.5.2. Ventajas

- Este método de explotación es de alta eficiencia en producción de toneladas por hombre.

- La exposición del personal al área de explotación es menor, por ello el método *sublevel stoping* es un método sumamente seguro.
- La disponibilidad del mineral en los tajos a partir de la voladura de las mallas de perforación es de manera inmediata.
- La ventilación es favorable por la forma de laboreo en las preparaciones y desarrollo de las labores.

2.5.3. Desventajas

- Mayor preparación en función a los subniveles
- No es selectivo
- Voladura secundaria frecuente
- Grandes cavidades vacías

2.6. Ciclo de minado

El ciclo de minado en la unidad minera Cerro Lindo consta de las siguientes actividades: sostenimiento, perforación, voladura, ventilación, desate mecanizado, limpieza y transporte. Estas actividades son necesarias para realizar el ciclo de minado de un frente de desarrollo para la preparación de acuerdo al método de explotación de “*sublevel stoping*”.

2.6.1. Sostenimiento

En los cruces, selladas, en la preparación de tajos en el nivel superior e inferior se colocan los cables *bolting* de 6.5 m a 15 m cuando el terreno lo requiera y previa evaluación geomecánica.

Existen labores que cruzan zonas de rocas de RMR bajo a muy bajo, este terreno de baja calidad de roca requiere el sostenimiento de *shotcrete*, perno helicoidal y malla electrosoldada y por último una capa adicional de *shotcrete*.

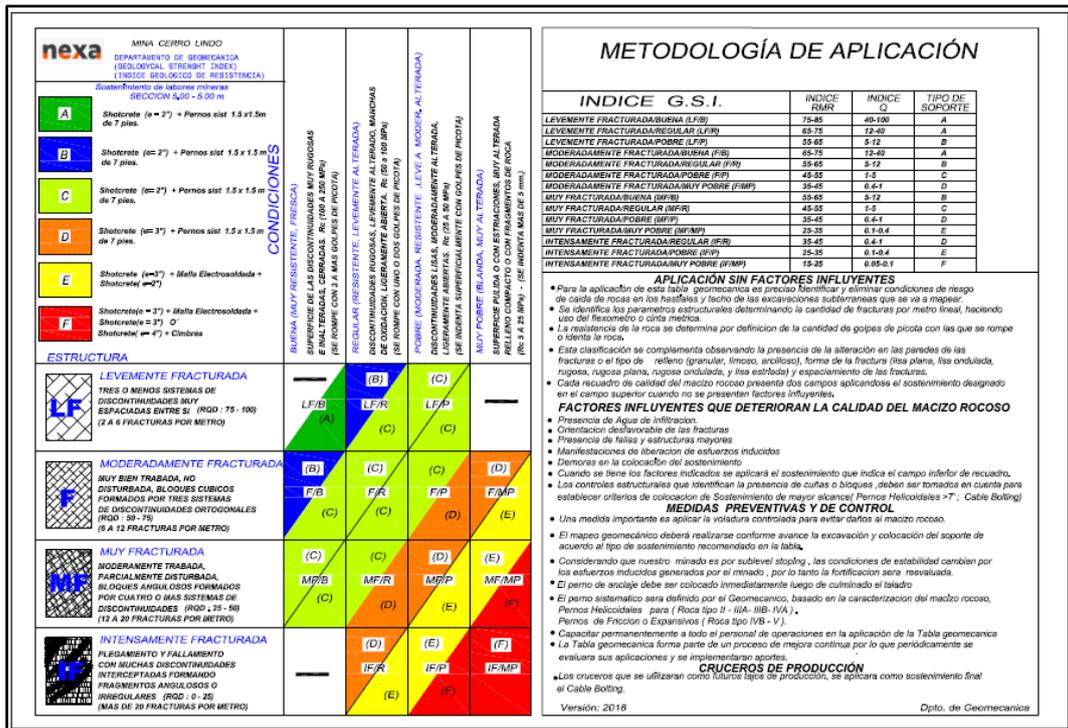


Figura 28. Tabla geomecánica de la unidad minera Cerro Lindo. Tomada del Departamento de Geomecánica

2.6.2. Perforación

El equipo SIMBA M4C (*Top Hammer*), perfora taladros largos de hasta 45 metros con broca de 3.5" de diámetro. Equipo con rayos láser para ubicar las secciones de perforación. Reducción de los tajos primarios y aumento del secundario (menos productivo). Reducción del volumen promedio de los tajos. Cambio en los parámetros de perforación de 2.5 x 2.5 a 3.5 x 3.5 m, ratio de perforación 21 t/m.

Este avance tecnológico ha sido muy importante para la evolución del sector minero, logrando cumplir con la exigencia de grandes operaciones, como es el caso de la U. M. Cerro Lindo.

Actualmente, en la unidad minera Cerro Lindo se realiza la perforación de frentes con equipos jumbo hidráulicos de dos brazos.



Figura 29. Equipo perforador fontanero en perforación.

2.6.3. Voladura

- Taladros del *Slot* pasantes disparados fila por fila hacia la chimenea ampliada, filas disparadas generando una zanja, cara libre abierta completamente.
- Hombros de las mallas radiales pasantes que serán disparados con el tajo superior.
- Mallas radiales pasantes disparadas.
- Galería inferior principal de limpieza.
- Tajo inferior relleno.
- Galería principal superior de voladura.
- Galería *slot* del tajo adyacente y ventana de limpieza para el tajo en perforación.



Figura 30. Frente cargado y amarrado

2.6.4. Ventilación

El proceso en el flujo de ventilación en la unidad minera Cerro Lindo está conformado por laboreos de ventilación, ventiladores primarios, extractores primarios y ventiladores auxiliares, actualmente estos equipos de ventilación componen una red que ingresa a mina 2000000 CFM logrando cubrir el requerimiento actual de 1700000 CFM.



Figura 31. Detector de gases

2.6.5. Desate mecanizado

El desate mecanizado se ejecuta mayormente después de cada voladura, ya que la roca sufre una transformación por causa de los disparos, el proceso tiene la finalidad de desatar o hacer caer las rocas sueltas en que se encuentran en la caja techo de las labores, así mismo, este tipo de anomalías puede presentarse en los hastiales, para ello se utilizan los desatadores electrohidráulicos BTI.

En la mayoría de las labores en interior de mina se desatan frentes como galerías, rampas, cruceros, etc.



Figura 32. BTI desatador mecánico

2.6.6. Limpieza y transporte

La limpieza y transporte también conocido como acarreo se realiza en combinación de un *scoop* y volquetes de 35 t, esta actividad se realiza en las cámaras de carguíos que cumplen un diseño específico para que los equipos puedan desarrollar el carguío sin dificultad.

Después de ello, los volquetes al trasladar mineral tienen dos objetivos, llevar el mineral a cámara de chancado primario o hacia superficie a una chancadora móvil.



Figura 33. Scoop para limpieza de frente

2.7. Bases teóricas del estudio

Seguidamente, se detalla el análisis de diseño de los diferentes diques tapón y su implementación en el método de minado *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

Ante lo cual, se describe la metodología sistemática, analizando y comparando las variables operacionales de diseño de los diferentes diques tapón aplicados en la unidad minera.

Este análisis permite conocer y detallar las variables geológicas, geomecánicas, metalúrgicas y económicas, para analizar los diferentes diques tapón implementados en el método de minado *sublevel stoping*, el procedimiento, considera el análisis detallado de diseño de los diferentes diques tapón y su comparativo técnica y económicamente, durante el periodo 2019 - 20 y su influencia en la reducción de costos del método de minado usado.

2.8. Caracterización geotécnica del relleno de mina

La caracterización geotécnica del relleno de mina involucra tanto las propiedades físicas y químicas, tales como la resistencia del relleno a la compresión simple y la distribución granulométrica. Hidrogeología del sitio.

2.8.1. Propiedades granulométricas del relleno

Tras la revisión de la granulometría del relave producido por Cerro Lindo, se ha identificado que este actualmente está en el rango de 33% a 43% por debajo de la malla N.º 200 (74 micras). Asimismo, en la historia de granulometría desde el 2011, se evidencia una amplia sensibilidad granulométrica que podría afectar a la resistencia del relleno cementado.

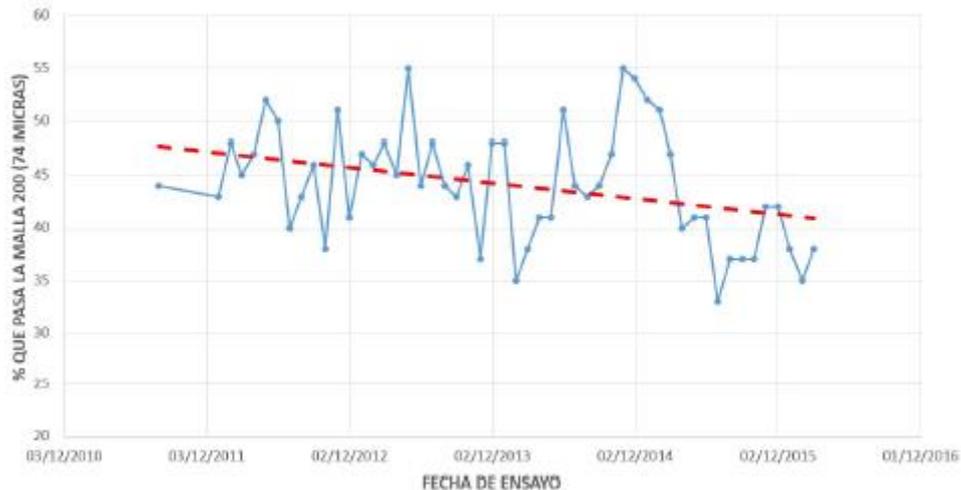


Figura 34. Historia de granulometría

2.8.2. Resistencia del relleno

Para la estimación de la resistencia de relleno requerida para garantizar la estabilidad del relleno durante la explotación de tajeos secundarios, se ha realizado una sensibilidad para diferentes factores de seguridad, con las siguientes consideraciones.

- Altura de los tajeos = 30 m
- Longitud de pared expuesta o longitud en tajeos secundario = 25 m
- Los criterios de UCS Mitchell, UCS Li (z=0) y UCS Tensión Crack (z=0) son equivalentes y considera la altura del relleno de 30 m, sin ninguna carga externa.
- Los criterios de UCS Li (z=30) y UCS Tensión Crack (z=30) son equivalentes y considera la altura del relleno de 60 m o dos tajeos primarios.
- Los criterios de UCS Li (z=60) y UCS Tensión Crack (z=60) son equivalentes y considera la altura del relleno de 90 m o tres tajeos primarios.

En las figuras siguientes se muestra de manera esquemática la geometría del relleno simulada y en los cuadros siguientes los valores de resistencia del relleno para los diferentes criterios de cálculo.

FS	Un tajeos primario = 30 m			Dos tajeos primarios = 60 m		Tres tajeos primarios = 90 m	
	UCS Mitchell	UCS Li, z=0	UCS Tension Crack, z=0	UCS Li, z=30m	UCS Tension Crack, z=30m	UCS Li, z=60m	UCS Tension Crack, z=60m
1.00	375	320	336	424	469	458	512
1.05	394	343	366	454	510	490	557
1.10	413	364	394	482	550	520	601
1.15	431	384	421	508	588	549	642
1.20	450	402	448	533	626	575	683
1.25	469	420	474	556	662	600	722
1.30	488	437	499	578	696	624	760
1.35	506	452	523	599	730	646	797
1.40	525	467	546	619	763	668	833
1.45	544	481	569	637	794	688	867
1.50	563	494	591	655	825	707	901

Figura 35. Evolución de la resistencia a la compresión. Tomada del Departamento de Geomecánica

En vista que el relleno se realiza en el lapso de los 10 primeros días y, a la vez, las presiones máximas se generan en los primeros días de fraguado. Se estimaron las propiedades de resistencia del relleno para el modelamiento numérico, en base a los ensayos de resistencia realizados y la experiencia en materiales similares:

Tabla 14. Propiedades físicas y resistencia del relleno

Material	Densidad (tn/m3)	Ángulo de Fricción (°)	Resistencia a la Cohesión (kPa)
Relleno Cementado sin Fragua	2.8	0	10
Relleno Cementado con 4 días de Fragua	2.8	20	100
Relleno Cementado con 7 días de Fragua	2.8	20	130

Tomada del Departamento de Geomecánica

2.9. Diseño de tapones

2.9.1. Consideraciones de diseño

A) Secuencia de llenado y presiones del relleno sobre el tapón

En la unidad minera Cerro Lindo se cuenta con el procedimiento de relleno de tajos ya que en su variedad los tajos están entre dos niveles, cabeza y pie de tajo, a una altura o potencia de 30 metros, estos tajos son rellenos en etapas

para que así el fraguado del relleno alcance una resistencia y dé soporte de resistencia a los tapones de concreto.

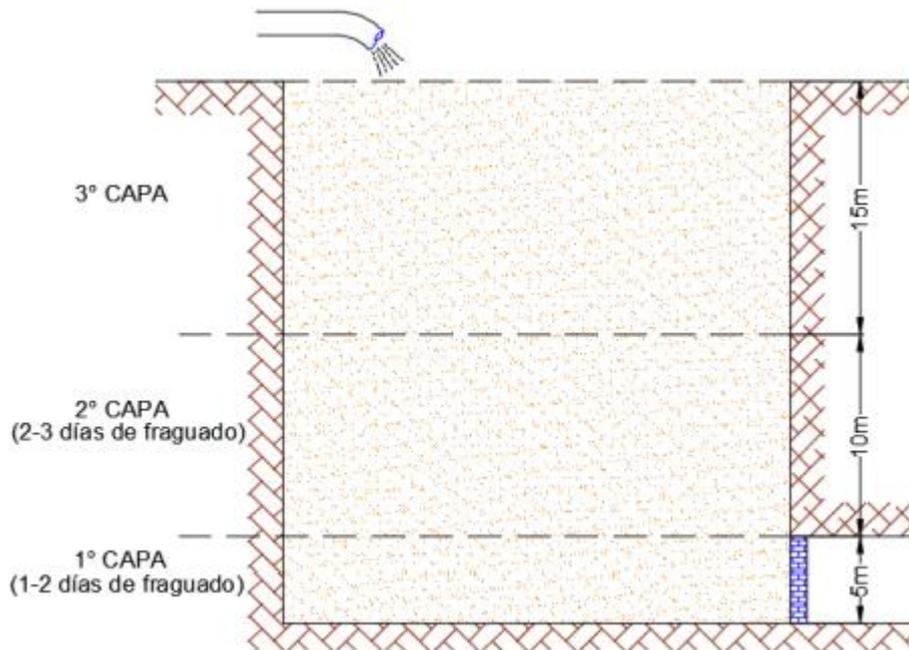


Figura 36. Secuencia de llenado de tajeos

A partir de dicha secuencia ha sido posible establecer la altura de relleno en pasta que generará presión sobre los tapones. Asimismo, es necesario aclarar que los 30 metros de relleno no representan la altura de presión debido a que este irá fraguando conforme se realice el relleno de los tajeos, por ende, es necesario modelar numéricamente los cambios de presión a lo largo del tiempo de llenado y establecer las presiones máximas para el diseño del tapón. Con el uso del programa de cómputo *Phases8.0*, se estimó mediante un modelo de elementos finitos elástico, que las presiones máximas se generan en los primeros 10 m de llenado, el cual es mostrado en el siguiente gráfico.

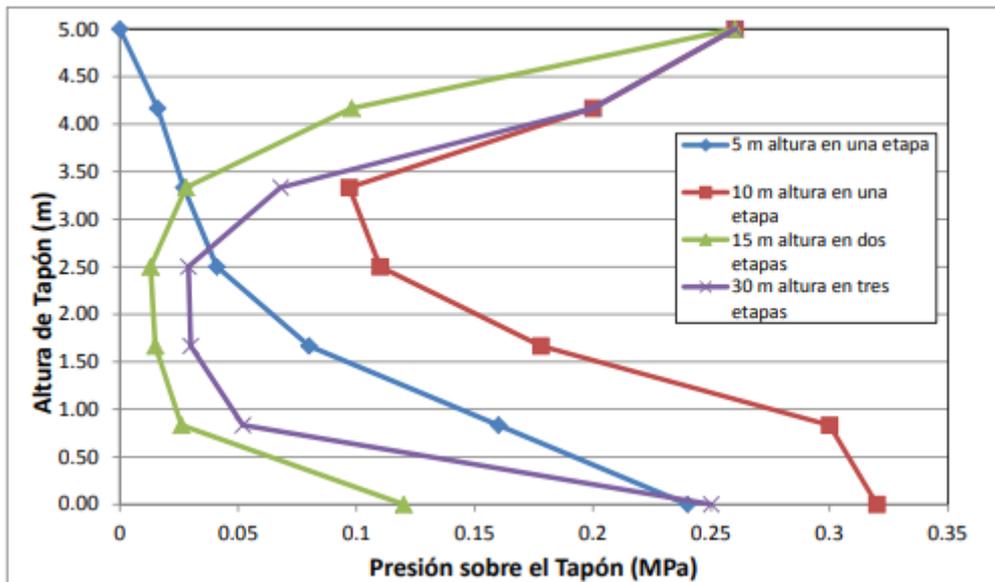


Figura 37. Presiones del relleno sobre el tapón a lo largo de la secuencia de llenado

Para el diseño de tapón se consideraron las presiones de 10 m de altura.

2.9.2. Diseño del tapón de concreto armado

A) Modelamiento numérico de las presiones del relleno sobre el tapón

El análisis estructural considera al tapón como un modelo bidimensional con apoyos fijos espaciados entre 40 y 50 cm a lo largo del perímetro de la cáscara. Las cargas del análisis consideran tanto la carga muerta por peso propio como las cargas de empuje del relleno de mina.

Este diseño para los muros tapones de concreto armado deben contar con una resistencia a la compresión F_c de 210 kg/cm^2 , el cual será reforzado con acero corrugado de grado 60 $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$, el diseño se tiene que regir a la norma ACI 318-05 y a la norma peruana E.060 de C° armado.

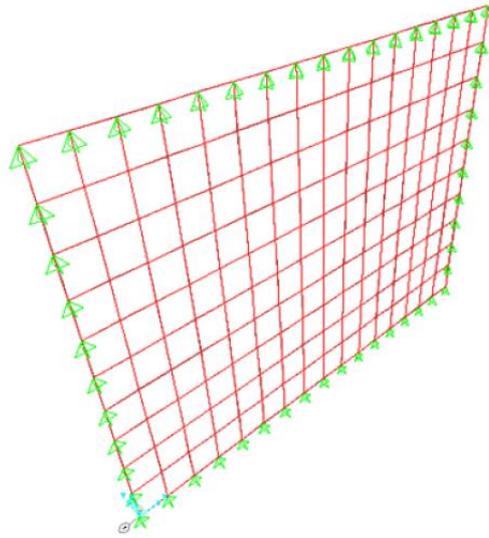


Figura 38. Modelo bidimensional del tapón en SAP2000

B) Diseño numérico

Seguidamente, se presentan algunos parámetros más utilizados en los diseños de tapones:

- Peso específico del concreto (kg/m^3): 2400
- Coeficiente de seguridad: 1.2
- $f'c$ (kg/cm^2): 210
- f_y (kg/cm^2): 4200

Se tomó una muestra de la sección típica de las labores de la unidad minera Cerro Lindo en una sección de 5 metros x 6 metros, para ello se usan pernos helicoidales de grado 75 en todo el perímetro.

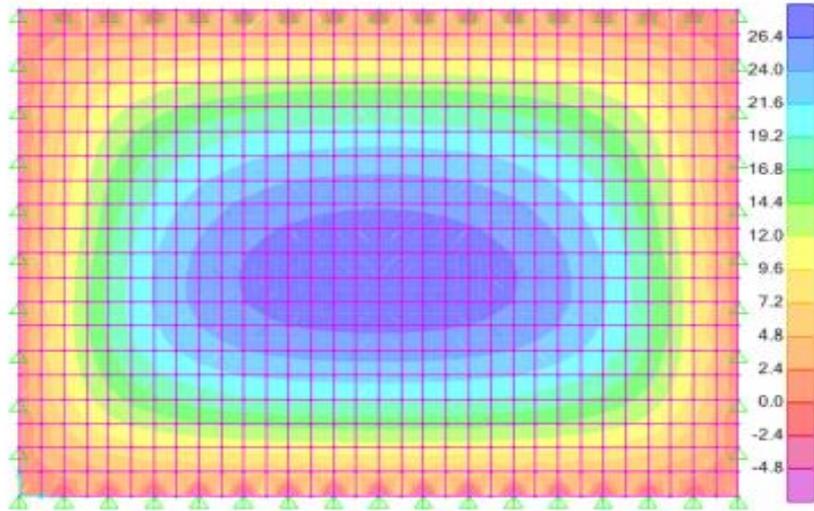


Figura 39. Momento flector en la dirección horizontal en el tapón (en tm)

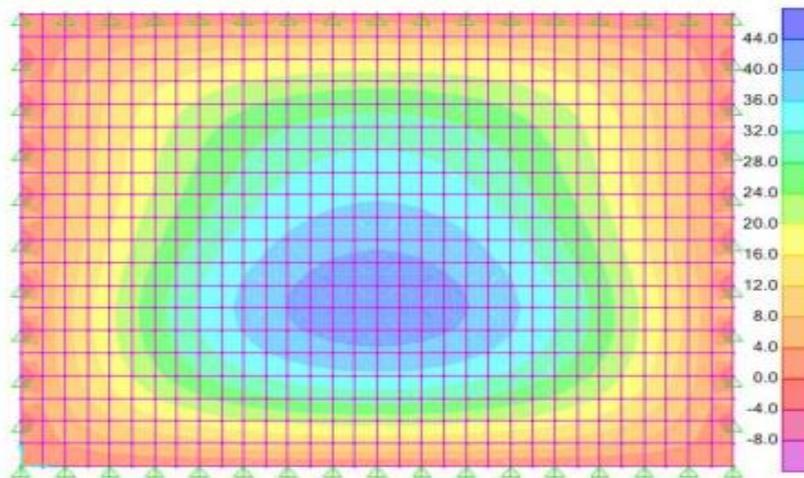


Figura 40. Momento flector en la dirección vertical en el tapón (en tm)

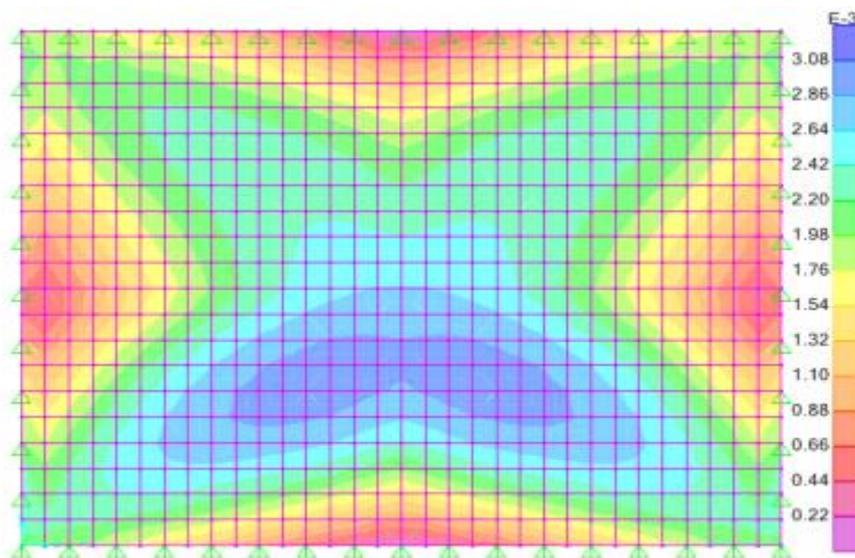


Figura 41. Acero de refuerzo horizontal necesario en el tapón (en m²/ml de tapón)

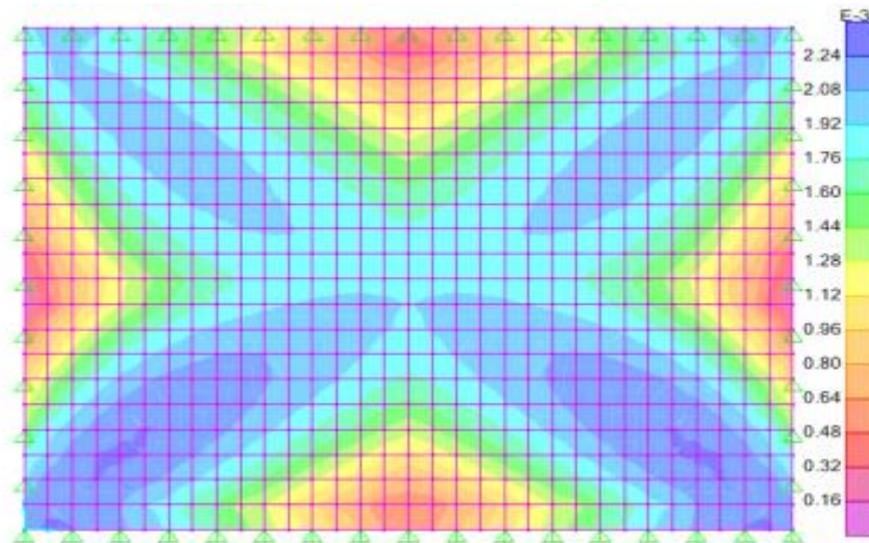


Figura 42. Acero de refuerzo vertical necesario en el tapón (en m²/ml de tapón)

De acuerdo a las pruebas elaboradas en el SAP2000 se tienen las siguientes recomendaciones para el diseño de construcción de los muros tapón:

- Espesor de muro de concreto armado es de 0.35 m.
- El acero de refuerzo será doble malla con acero de 5/8" con un espaciamiento de 0.20 m vertical y horizontalmente.
- Su recubrimiento para el refuerzo del muro es de 7.5 m.

Asimismo, para el caso del tapón en V, se recomienda reforzar la parte central de la unión con un espesor de concreto de 60 cm.

C) Cálculo de anclaje del tapón

Para este proceso se está considerando pernos helicoidales de grado 75 en todo el perímetro donde se construirá el muro de concreto armado, esto con la finalidad de superar la fuerza cortante y axial de la presión del relleno en pasta. En la siguiente descripción se evidencian las características de los pernos de anclaje.

Tabla 15.
Parámetros de anclaje de muro de concreto armado

Descripción	Parámetro
Resistencia al arranque de los pernos de anclaje en roca	10 a 12 tn/m
Tipo de Pernos de Anclaje	Pernos helicoidal de 25 mm de diámetro acero Grado 75
Anclaje	Lechada cemento
Anclaje de perno en la roca	5 pies para tapón recto 6 pies para tapón en V
Anclaje de perno en muro de concreto	4 pies

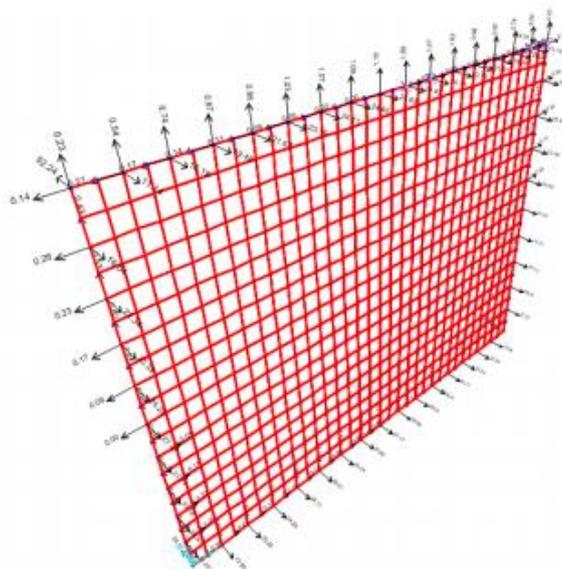


Figura 43. Distribución de las cargas a lo largo del muro de concreto armado

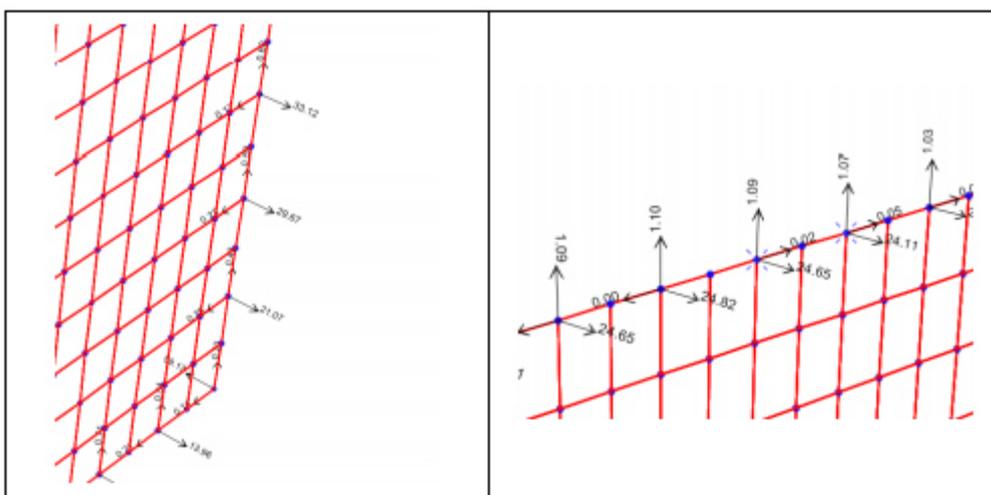


Figura 44. Reacciones en los pernos de anclaje (Método numérico – SAP2000)

En las figuras se observan los valores máximos obtenidos en tracción y en corte para las reacciones en los pernos, los cuales son 1.10 t y 33.12 t respectivamente. La resistencia en tracción de los pernos está dada por el esfuerzo de fluencia. Dado que se trata de acero grado 75, el esfuerzo máximo en tracción será de 7030 kg/cm², es decir 7 t/cm².

Para este proyecto se ha considerado un perno helicoidal de 1" de diámetro, por lo que se tiene un área nominal de 5.07 cm². Con este valor de área, la resistencia del perno en tracción será de 35.5 t, mayor a 1.10 t, valores obtenidos de las solicitudes.

Para la resistencia al corte de los pernos se ha considerado un 80% de la resistencia a la tracción, esto es 28.4 t. Así, más del 85% de los pernos se encuentran en condición favorable, por lo que se valida el diámetro de perno seleccionado.

Para el arrancamiento de los pernos se consideró una resistencia de 12 t/m. Los pernos proyectados tienen una longitud de anclaje de 5 pies, esto es 1.5 m, por lo que su resistencia total será de 18 t, superior a las solicitudes en tracción de los pernos según el análisis estructural.

En conclusión, los pernos helicoidales tienen que cumplir las siguientes especificaciones:

- Grado 75
- Diámetro de 1"
- Longitud de 9 pies
- 5 pies anclado a roca *in situ*
- 4 pies anclado a concreto

2.9.3. Diseño de tapón de desmonte de mina más muro de piedra emboquillada

Para el presente diseño del tapón de desmonte de mina más muro de piedra emboquillada se ha tomado como base la Guía para el Diseño de Tapones

para el cierre de labores mineras. El diseño y cálculo para este tipo de tapón ha sido adaptado a partir de los lineamientos establecidos para los tapones de concreto armado y de lados paralelos.

La evaluación de la estabilidad del tapón será evaluada a partir de la falla por corte, el resto de los modos de inestabilidad potencial (falla por flexión de viga gruesa y falla por filtración excesiva) no son considerados en este diseño debido a la geometría del tapón y a las propiedades del relleno, el cual ejercerá presión sobre los tapones.

La falla por corte implica básicamente la falla de corte a través del concreto, al largo del contacto con la roca/concreto o a través del macizo rocoso, se evalúa la condición más desfavorable y se determina la longitud/espesor del tapón para garantizar la estabilidad del mismo.

A) Parámetros de diseño

Las condiciones iniciales para realizar el diseño de este tipo de tapón son las siguientes:

- La sección típica en la que se construirá el tapón será de 6 m de ancho y 5 m de alto.

- La presión sobre el tapón será de una carga de 5 m inicial con dos días de fraguado, 10 m de llenado, con tres días de fraguado y 15 m restantes hasta la altura máxima del tajeo:
 - ✓ La Resistencia a la compresión uniaxial del muro (f_c') será de 5 MPa
 - ✓ La densidad del relleno es de 2.8 t/m^3
 - ✓ Los parámetros de la roca son: RMR = 46 y resistencia cizallante del macizo rocoso = 600 kPa
 - ✓ Gradiente hidráulica máxima permisible: 8 (m/m)
 - ✓ Gradiente a presión máxima permisible: 80 (kPa/m)
 - ✓ Factor de seguridad: 1.5

B) Diseño de tapón por método de falla de corte

Este enfoque considera que la carga producida por las presiones, en este caso debido al relleno, se transmitirá desde el tapón de piedra emboquillada a la roca como corte alrededor del perímetro de este y en su longitud.

Asimismo, la longitud del tapón se determinará de tal forma que el esfuerzo al corte en la roca adyacente se mantenga bastante por debajo de su resistencia al corte estimado. Como resultado de ello, la falla al corte en el muro de piedra emboquillada debe ser evaluada, en el contacto del concreto con la roca, y a través del macizo rocoso.

La carga (W) por la presión del relleno sobre el tapón se determina de la siguiente manera

$$W = H (m) * G.E \left(\frac{KN}{m^3} \right) = \frac{12 * 28}{1000} = 0.34 MPa$$

C) Verificación de la resistencia al corte del muro

El esfuerzo de corte permisible (f'_s) para el muro sin refuerzo se determina de la siguiente manera:

$$f'_s = 166.1 * \sqrt{f'_c} = 166.1 * \sqrt{3} = 288 KPa$$

D) Verificación de la resistencia al corte del macizo

La resistencia cizallante máxima permisible del macizo rocoso se obtiene del siguiente modo:

$$f'_{mr} = \frac{600}{FS} = 600 * 1.5 = 400 KPa$$

La falla por corte estará controlada por el esfuerzo de corte permisible desarrollado en el muro, debido a que presenta el menor valor de resistencia al corte, respecto al macizo rocoso.

E) Cálculo de la longitud de tapón de diseño

Longitud del tapón basada en la resistencia al corte en la interfaz muro-roca (enfoque sudafricano)

$$L = \frac{W * A}{\text{Perímetro} * f'_s} = \frac{0.34 * 6}{12.4 * 0.0288} = 0.57 \text{ m}$$

Longitud del tapón basada en la resistencia de soporte del muro y la roca en el interfaz

$$f_c = 3.75 * f'_s = \frac{3.75 * 400}{1000} = 1.50 \text{ MPa}$$

$$L = \frac{2 * W * A}{P_e * f_c} = \frac{2 * 0.34 * 6}{12.4 * 1.50} = 0.22 \text{ m}$$

F) Gradiente hidráulica empírica/verificaciones de infiltración

La práctica sudafricana requiere que se realicen las verificaciones en la longitud del tapón para garantizar que la gradiente de presión (P/L) a lo largo del tapón no exceda el criterio siguiente:

- P/L < 470 kPa/m donde el contacto entre el tapón y la roca no está inyectado
- P/L < 3660 kPa/m, donde la presión de inyección aplicada en el macizo rocoso alrededor del tapón es al menos el doble de la presión hidrostática de diseño

Si se considera un valor de P/L igual a 915 kPa y un factor de seguridad igual a 1.5, se tendrá:

$$\frac{P}{L} = \frac{915}{1.5} = 763$$

$$L = \frac{W}{\frac{P}{L}} = \frac{336}{763} = 0.44 \text{ m}$$

Finalmente, luego de realizar todos los análisis necesarios se determina que la longitud total del tapón será 0.60 metros para controlar la falla por corte.

Adicionalmente, se realizó una modificación al tapón obtenido a partir de los cálculos, con la finalidad de brindarle una geometría y características que permita contrarrestar de manera óptima las presiones debido al relleno.

Por tal motivo, se consideró una base superior de 0.6 m y una base inferior de 1 m, obteniéndose un muro de piedra emboquillada de sección trapezoidal con 1.2 m de alto y un ancho de 5 metros.

Este tapón estará construido sobre desmante de mina, tal como se muestra en la figura inferior.

Asimismo, se colocará una capa de geotextil no tejido (200 gr/cm²) o tela arpillera, para asegurar solo la filtración de agua a través del tubo de HDPE corrugado y perforado.

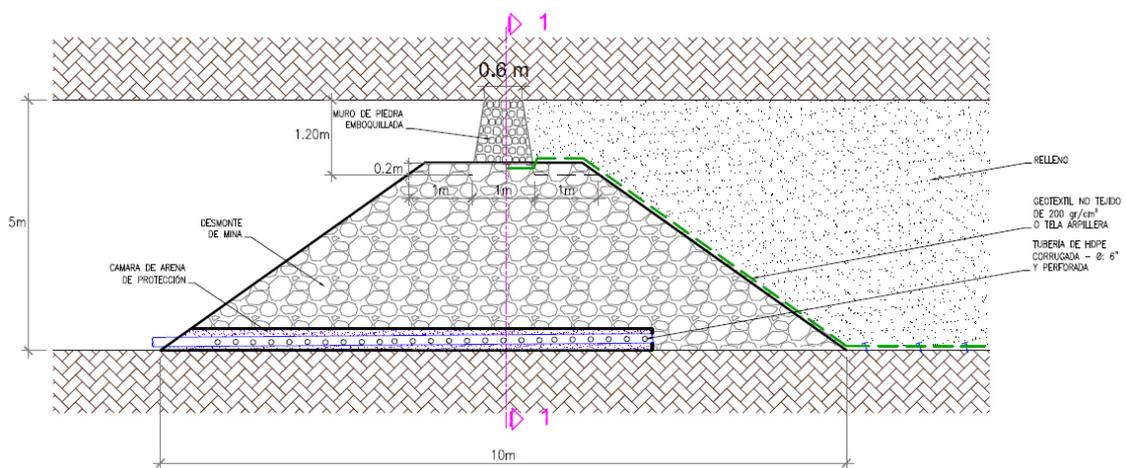


Figura 45. Vista longitudinal tapón de desmante de mina más muro de piedra emboquillada

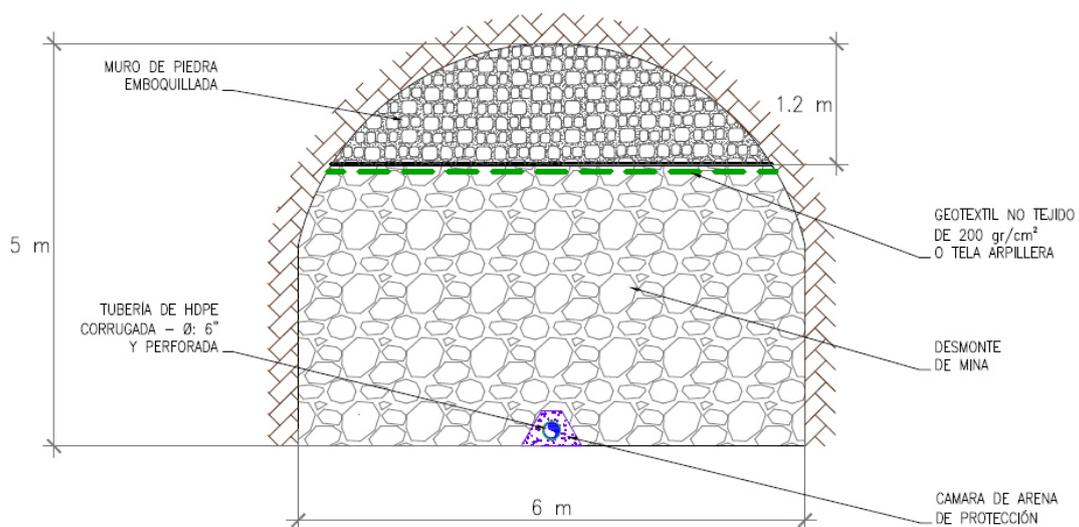


Figura 46. Sección transversal de tapón de desmante más muro de piedra emboquillada

2.9.4. Diseño del tapón de madera

A) Parámetros de diseño

Para el diseño del tapón de madera se ha considerado madera de eucalipto como soporte vertical del tapón. El eucalipto es un tipo de madera con buenas propiedades mecánicas.

Como referencia para una primera aproximación de los parámetros de resistencia del eucalipto, se revisó la información contenida en el libro Diseño de ademes en mina de Cemal Biron et al. De este, se obtuvo una referencia del valor de la resistencia en tensión del eucalipto, la cual bordea los 1200-1400 kg/cm² debido a que se asume que la madera de eucalipto de los troncos a ser usados se encuentra seca al aire, lo que le da un contenido de humedad entre el 10% y el 12%.

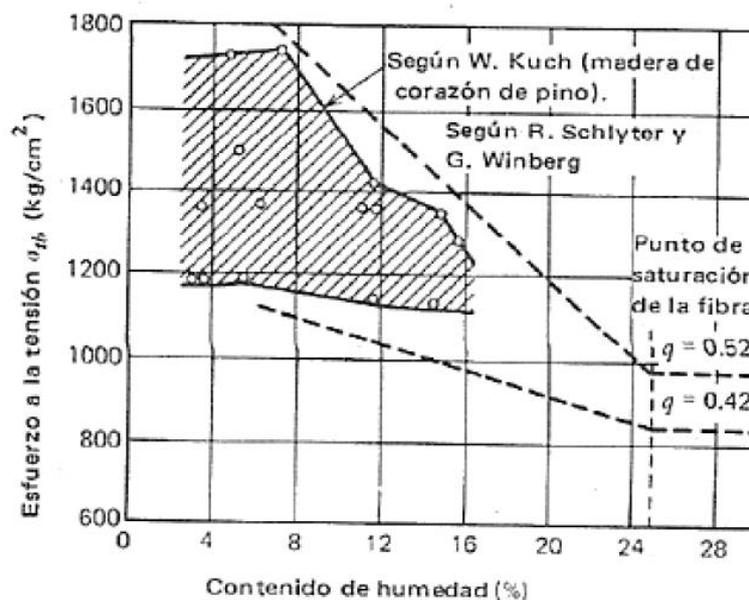


Figura 47. Valores del esfuerzo a la tensión de la madera respecto del contenido de humedad. Tomada del Diseño de ademes en mina (9)

Los parámetros de la resistencia de este material han sido obtenidos de la siguiente tabla:

Tabla 16.
Propiedades mecánicas de la madera

PROPIEDADES	Media	Rango	Coef. de variación	Resultado
Peso específico	0.76	0.42 - 1.07	11% a 20%	Medio
Dureza	6.0	3 - 10.1	22% a 28%	Medio-Alto
Contracción radial total (%)	7.5	2.9 - 11.6	13% a 30%	Alto
Contracción tangencial total (%)	13.8	6.9 - 20	8% a 27%	Alto
Punto de saturación de la fibra (%)	37	27 - 53	5% a 14%	Alto
Módulo de elasticidad (Mpa)	20580	6500 - 33000	17% a 31%	Alto
Resistencia a la compresión (Mpa)	71	39 - 107	12% a 20%	Alto
Resistencia a la flexión (Mpa)	130	48 - 181	12% a 23%	Alto

Tomada del CIS-Madera/CIRAD-Foret

Finalmente, con la referencia de los valores de la bibliografía y la tabla anteriormente mostrada, el valor de resistencia a la flexión que se usó fue de 1000 kg/cm² o 100 MPa.

B) Diseño numérico

Al igual que el tapón en concreto armado, el diseño del tapón en madera se ha hecho con ayuda del programa SAP2000 para el cálculo de las fuerzas resultantes de la interacción de las cargas en la estructura. Los resultados y cálculos obtenidos se muestran en el anexo correspondiente.

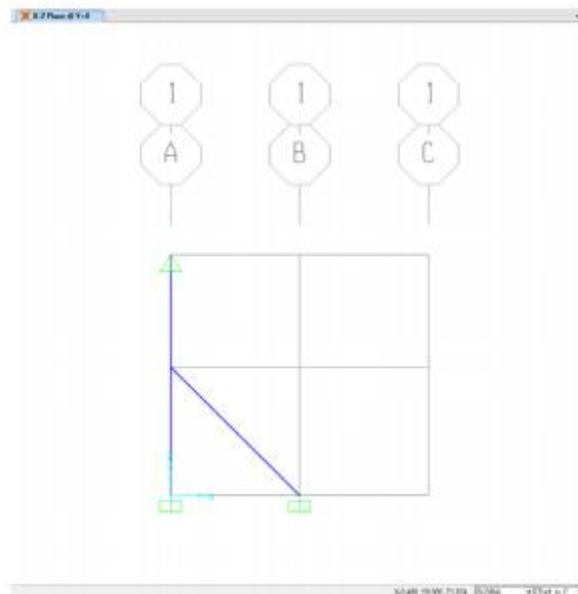


Figura 48. Modelo estructural del soporte de madera del tapón en SAP2000

A partir de los resultados obtenidos, la configuración del muro queda de la siguiente manera:

- ✓ El tapón se compondrá de maderos verticales de eucalipto espaciados cada 50 cm, con tablas horizontales de 20 cm de ancho que compondrán la pared del tapón.
- ✓ Toda la estructura se apoyará ayudado con puntales de madera dispuesto cada 50 cm. El detalle de la configuración y las consideraciones de este se encuentran en los planos correspondientes.

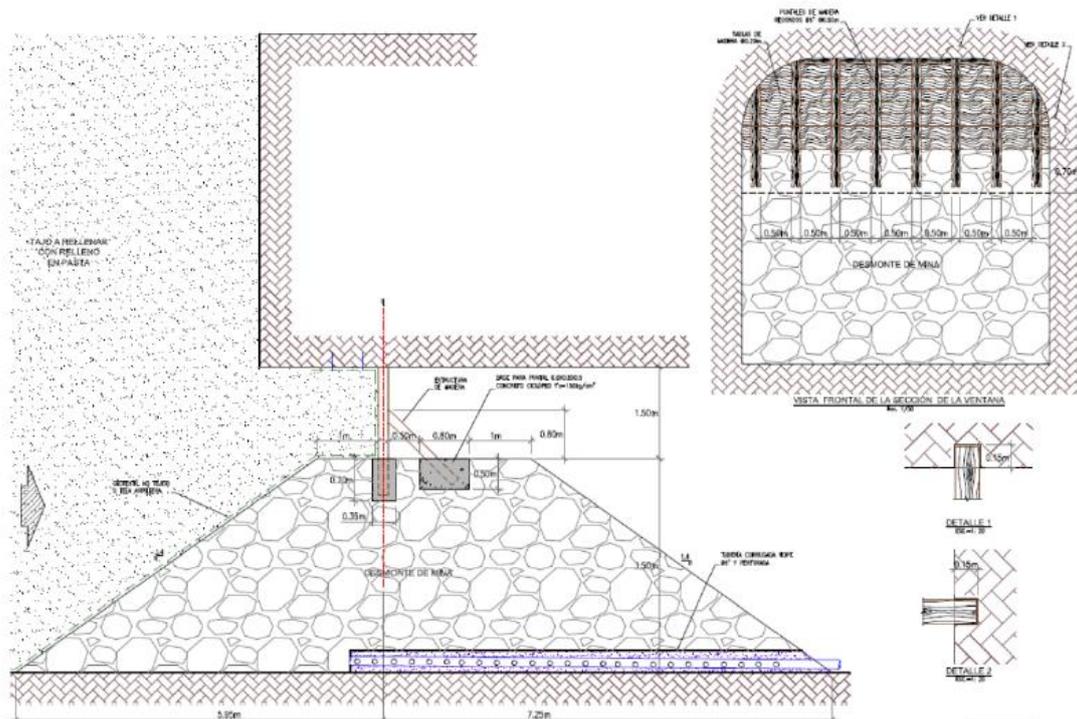


Figura 49. Vista longitudinal y transversal del tapón de desmonte de mina más muro de puntales de madera

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método y alcances de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

En el presente trabajo de investigación se aplicó el método de investigación científico, este método permite al investigador reunir, procesar y fijar información relevante en una forma ordenada, sistemática y siguiendo procedimientos estructurados para abordar el problema.

A. Método general

Se aplicó el método inductivo - deductivo., el cual se orientó a observar e investigar en detalle las variables técnicas y económicas, así mismo, aplicar criterios para analizar los resultados que se obtienen en la producción. El análisis de los parámetros de diseño del dique tapón, permitió la forma de mejorar la productividad en el relleno.

B. Métodos específicos

El procedimiento de recolección y procesamiento de información determinó el análisis de las variables de diseño del dique tapón. El análisis de la información permitió la observación directa de las variables.

Recopilación de informes anteriores. Con la finalidad de poder entender el desarrollo de las actividades en la unidad minera, se recopiló toda la data de las áreas de geología, geomecánica, mina, planta y planeamiento.

Trabajo de campo. Se realizó el trabajo de campo con las observaciones pertinentes de mapeo, monitoreo de convergencia/divergencia, análisis de tiempo y costeo en el diseño de dique tapón con diferentes materiales para el relleno, en el método de explotación *sublevel stoping*.

Trabajo de gabinete: Se realizaron los estudios de diseño operacional, control de tiempos y costos en el diseño de dique tapón con diferentes materiales.

Resultados. Se realizó la evaluación de los resultados en términos de tiempo y costos en el diseño de dique tapón con diferentes materiales como contención en el relleno para los tajos minados mediante el método de explotación *sublevel stoping* de la unidad minera Cerro Lindo.

3.1.2. Alcances de la investigación

El presente trabajo de investigación se realizó aplicado en el área de relleno tanto en superficie en planta y en interior de mina en todos los tajos a rellenar de la unidad minera Cerro Lindo, enfatizando el diseño del dique tapón para los tajos a rellenar con el método de explotación *sublevel stoping*.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue descriptiva longitudinal el cual permitió la evaluación y la descripción del comportamiento de una variable en este caso, el diseño de los diques taponos de diferentes materiales, esta descripción implica la observación sistemática del diseño de estudio.

3.2.1. Tipo de diseño de investigación

GNO: 01 (T1, T2, T3, T4)

02 (T1, T2, T3, T4)

GNO: 01 y 02

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Está conformado por todos los tajos vacíos extraídos por el método de explotación *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo.

3.3.2. Muestra

Está conformada por los diferentes diques tapón aplicados al método de minado *sublevel stoping*, de acuerdo a la caracterización del material geotécnico en estudio.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación científica permite una diversidad de técnicas e instrumentos de recolección de datos de acuerdo al método y tipo de investigación a realizar.

3.4.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos

- ✓ Observación de la información recolectada
- ✓ Revisión de la bibliografía referente al tema de investigación
- ✓ Recopilación de información de campo

3.4.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos

- ✓ Plantillas de Microsoft Excel 2010
- ✓ Libros
- ✓ Bibliografía de Internet
- ✓ PC
- ✓ Tablas estadísticas
- ✓ Otros

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta el análisis e interpretación de las variables técnicas y económicas de los diferentes diques tapón para la reducción de costos aplicados en el método de minado *sublevel stoping* de la unidad minera Cerro Lindo. Para lo cual se analizó el dique tapón de concreto armado, dique tapón de desmonte de mina más piedra y dique tapón de desmonte de mina más puntales de madera.

4.1. Consideraciones generales del estudio

Las condiciones actuales consideran el uso de diques tapón de concreto armado, dique tapón de desmonte de mina más piedra y dique tapón de desmonte de mina más puntales de madera.

Las consideraciones del estudio consideran una secuencia de llenado que se realiza en etapas, que se viene ejecutando en la unidad minera Cerro Lindo, el cual favorece a la disminución de presión sobre el tapón.

a) Resistencia de relleno

La resistencia de relleno varía desde:

- ✓ 0.3 a 0.6 MPa para un tiempo de fraguado de 7 días.
- ✓ 0.4 a 0.9 MPa para 14 días de fraguado; llegando a un pico de resistencia a los 28 días y después disminuye de manera gradual.

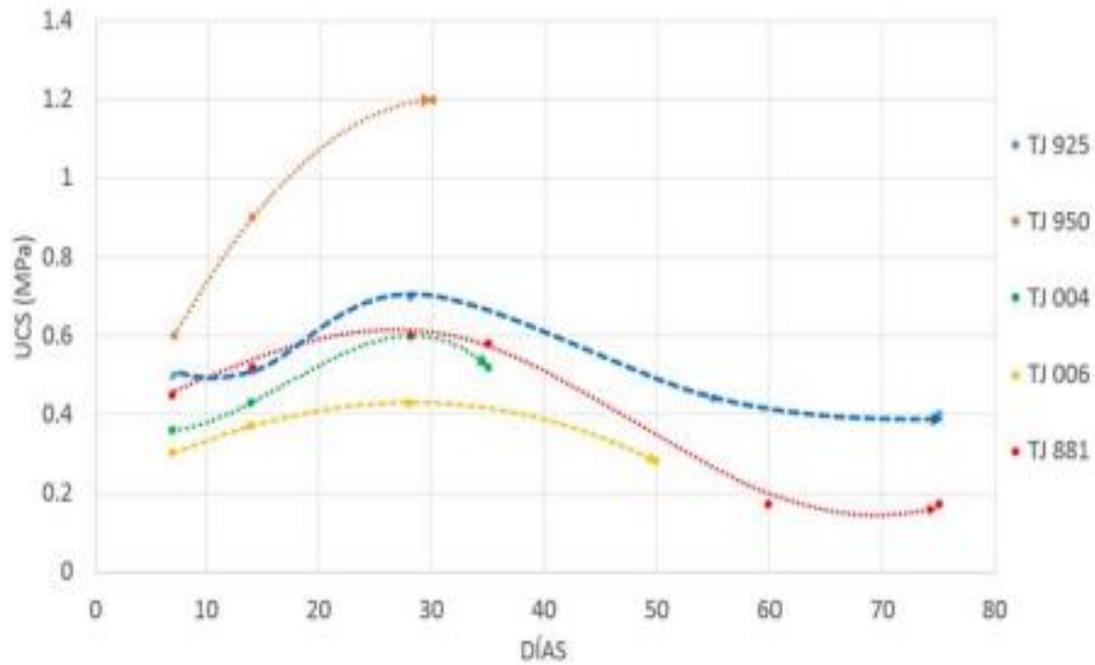


Figura 50. Evolución de la resistencia a la compresión para los tajeos TJ 925, TJ 950, TJ 004, TJ 006, TJ 881

b) Presiones de relleno

El modelamiento de elementos finito considerando el modelo elástico, modelaron las presiones de relleno sobre el dique tapón, donde se determina que las presiones más desfavorables, se presentan en las primeras etapas de llenado, considerando una altura de llenado de 5 metros en una etapa, 10 metros de altura en una etapa, 15 metros de altura en dos etapas y 30 metros de altura en tres etapas.

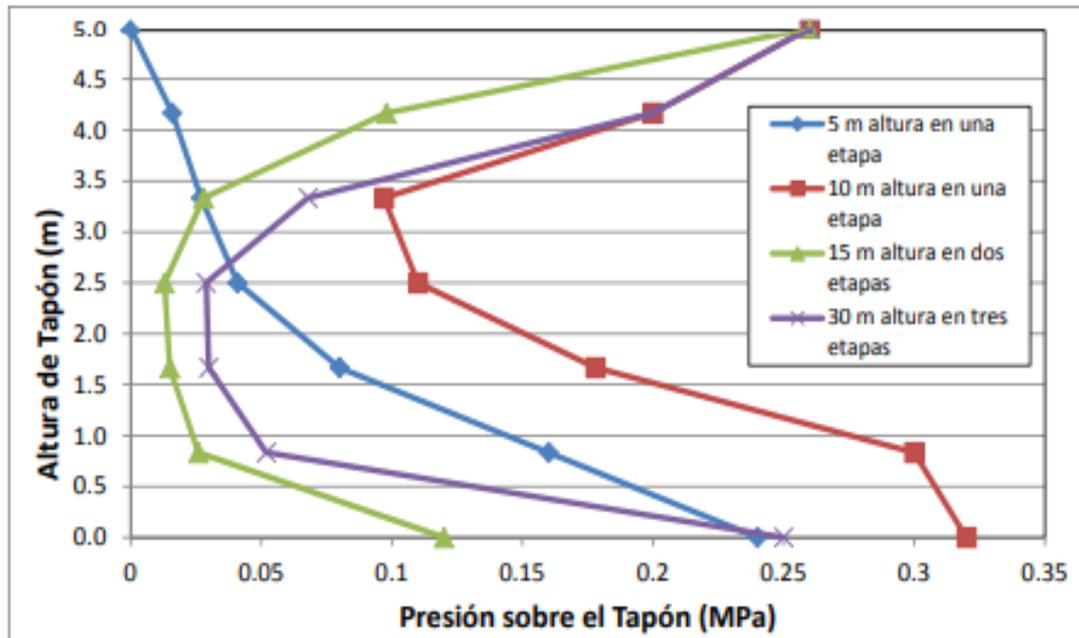


Figura 51. Presiones del relleno sobre el tapón a lo largo de la secuencia de llenado

c) Calidad del macizo rocoso

Las consideraciones de la calidad del macizo rocoso, circundante a los tapones, la aprecian como una roca que predomina a una roca regular y en algunos sectores a una roca mala.

Tabla 17.
Resultados de los índices y calidad del macizo rocoso

Dominios Geotécnicos	σ_{ci} (MPa)	RQD (%)	RMR	Q'	GSI
Mineral	50	50	50	1.95	50

4.2. Parámetros de dique tapón de concreto armado

De acuerdo a los criterios realizados de presiones de relleno sobre los tapones que se vienen utilizando en la unidad minera Cerro Lindo, las características técnicas aplicadas en el dique tapón de concreto armado son:

Tabla 18.
Parámetros de diseño de tapón de concreto armado

Descripción	Criterio de Diseño	Comentario
Espesor de Muro de Concreto	0.35 m	
Resistencia del Concreto	210 kg/cm ²	Para alcanzar la resistencia requerida a menor tiempo se debe utilizar acelerantes de endurecimiento, según el diseño de mezcla.
Acero de refuerzo	Doble malla de acero 5/8" @ 0.2 m	Fierro de construcción grado 60
Tipo de Pernos de Anclaje	Pernos helicoidal de 1" o 25 mm de diámetro acero Grado 75	Longitudes de anclaje en roca 5 pies y anclaje en concreto de 4 pies
Tipo de Cemento	Tipo V	Milpo
Sistema de Drenaje	Tres tubos HDPE de 4" de	

Descripción	Criterio de Diseño	Comentario
	diámetro, corrugada y perforada.	
Filtro y Subdren	Geotextil no tejido de 200 gr/m ² Piedra limpia de desmonte > 2"	

En el caso del muro de tipo V, se debe reforzar la esquina con un espesor de concreto de 0.6 m, según los planos de diseño. Asimismo, la longitud de anclaje en roca debe aumentar a 6'.

Se recomienda controlar la sobreexcavación de los tajeos por efecto de la voladura, para minimizar la frecuencia de construcción de los tapones tipo V.

4.3. Parámetros de dique tapón de desmonte más piedra

De acuerdo a los criterios realizados de presiones de relleno sobre los tapones que se vienen utilizando en la unidad minera Cerro Lindo, las características técnicas aplicadas en el dique tapón de desmonte más piedra emboquillada son:

Tabla 19.

Parámetros de diseño de tapón de desmonte de mina más piedra

Descripción	Criterio de Diseño	Comentario
Espesor de Muro de Piedra Emboquillada	0.60 m en la parte superior 1.0 m en la base	Piedra de desmonte más mortero de cemento
Muro de desmonte de Mina	Talud de Reposo 1.5H:1.0V Ancho de berma superior 3 m Ancho de Base 10 a 12 m	Desmonte apilado con equipo
Sistema de Drenaje	Tubo HDPE de 6" de diámetro, corrugada y perforada.	
Filtro	Geotextil no tejido de 200 gr/m ² o tela arpillera	

El desmonte utilizado del dique tapón de desmonte más piedra, provendrá de las diferentes labores de desarrollo próximo a los tajeos minados mediante el método de minado *sublevel stopping*.

Los costos de dique tapón con desmonte son menores comparados con el costo de dique tapón de concreto armado, por el uso de material de desmonte de las labores de desarrollo lo que optimiza en tiempo y distancia.

4.4. Parámetros de dique tapón de desmonte más puntales de madera

De acuerdo a los criterios realizados de presiones de relleno sobre los tapones que se viene utilizando en la unidad minera Cerro Lindo, las características técnicas aplicadas en el dique tapón de desmonte más puntales de madera son:

Tabla 20.

Parámetros de diseño de tapón de desmonte de mina más puntales de madera

Descripción	Criterio de Diseño	Comentario
Diámetro de Puntales de Madera	6"	
Espaciamiento entre Puntales Verticales	0.5 m	
Tablas de Madera Horizontal	2" espesor	
Cimentación de los Puntales sobre desmonte	Cemento más piedra (concreto ciclópeo 150 kg/cm ²)	
Muro de desmonte de Mina	Talud de Reposo 1.5H:1.0V Ancho de berma superior 3.5 m Ancho de Base 10 a 13 m	Desmonte apilado con equipo
Sistema de Drenaje	Tubo HDPE de 6" de diámetro, corrugada y perforada.	
Filtro	Geotextil no tejido de 200 gr/m ² o tela arpillera	

Al igual que en el caso del dique tapón con desmonte más piedra, el desmonte de dique tapón con desmonte más puntales de madera provendrá de las labores de desarrollo cercanas a los tajeos minados mediante el método de explotación *sublevel stoping*.

Considerando el análisis de diseño de los diques de tapón con concreto armado, dique tapón con desmonte más piedra y dique tapón con desmonte más puntales de madera, y los materiales usados en cada uno de ellos, se define que el menor costo de diseño de dique tapón es el de dique tapón con desmonte más piedra.

a) Consideraciones finales de diseño de dique tapón

Para la ubicación de los tapones se recomienda considerar preferentemente calidades del macizo rocoso con RMR > 40.

Para el monitoreo de las presiones del relleno sobre el tapón se recomienda el uso de Celdas de Presión NATM o equivalente con la finalidad de medir las presiones del relleno sobre el tapón y confirmar los diseños del presente estudio.

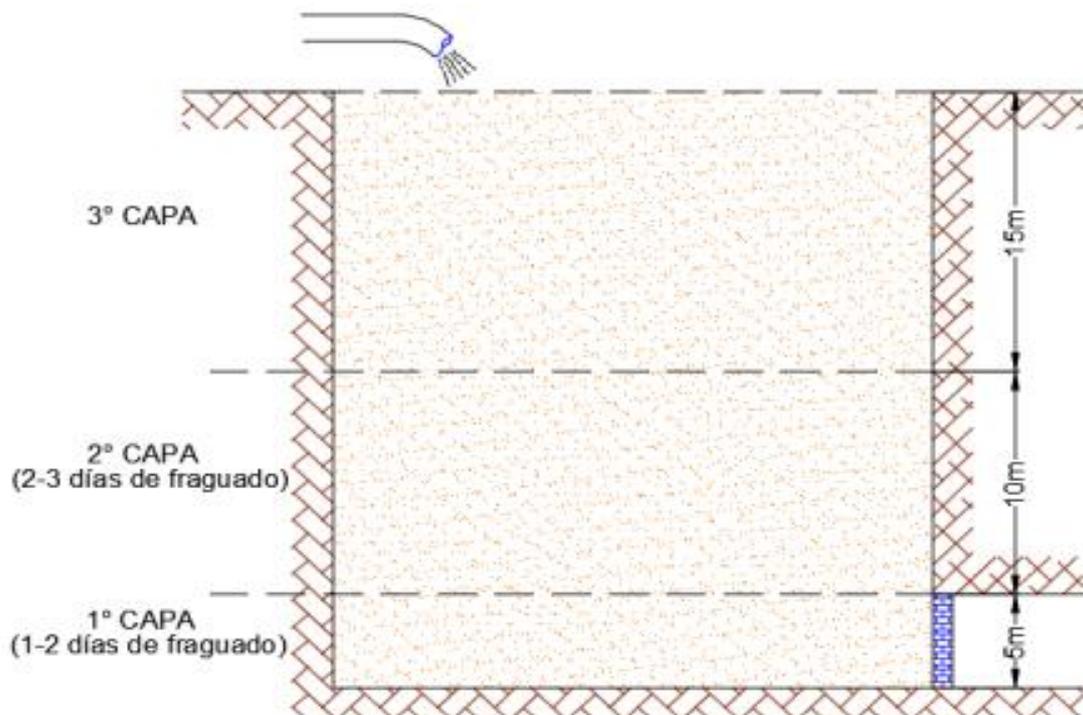


Figura 52. Secuencia de llenado del relleno para garantizar la estabilidad de los tapones

4.5. Análisis de costos de dique tapón

De acuerdo a los estudios realizados se describen los costos unitarios de los diques tapón de muro de concreto, tapón de desmonte y tapón de madera, considerando un análisis de producción de diques durante el periodo 2019 y 2020, analizando su incidencia en el costo del método de minado *sublevel stoping*.

a) Costos unitarios de los diques tapón

Los costos unitarios a junio del 2020 de diques tapón de muro de concreto, tapón de desmonte y tapón de madera, son US \$ 8015.50, US \$ 3674.23 y US\$ 3271.53 respectivamente.

Tabla 21.

Precios unitarios de diseño de tapón de concreto armado

OBRA: CONSTRUCCION DE MURO TAPÓN, NIVEL 1680 OB5 T-007 MURO-01			
SITE: UNIDAD MINERA CERRO LINDO		UBICACIÓN: Nivel 1680 OB5 Cx. 007	
SOLICITUD: SUPERINTENDENCIA MINA		SOLICITANTE:	FECHA: 25/06/2020

PART	DESCRIPCIÓN	Und	Metrado	P.U.	Parcial	Sub Total	
1.00.00	TRABAJOS PRELIMINARES						
1.00.01	TRAZO Y NIVEL DE REPLANTEO	M2	31.00	1.86	57.66	57.66	
1.00.02	EXCAVACION DE TERRENO (PARA CIMENTACIÓN)	M3	0.12	33.23	4.12	4.12	
1.00.03	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	0.12	25.13	3.12	3.12	
1.00.04	MOVILIZACION & DESMOVILIZACION (MAT. Y EQ.)	UND	4.00	48.30	193.20	193.20	
2.00.00	ANCLAJE DE MURO PARA RESERVORIO						
2.00.01	PERFORACIÓN CON JACKLEG, PERNO DE ACERO A615-25MM x 9'	UND	47.00	31.53	1481.91	1481.91	
3.00.00	COLOCACION DE CONCRETO F'C 210						
3.00.01	CONCRETO Fc=210Kg/Cm3	M3	3.28	193.75	634.83	634.83	
4.00.00	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO						
4.00.01	Encofrado y Descenofrado de Muro 1er Nivel	M2	48.64	26.44	1286.00	1286.00	
5.00.00	ACERO REFUERZO EN MURO Fy=4200 kg/cm2						
5.00.01	Malla Acerada Horz.= Ø 5/8" x Vertic.= Ø 5/8"	Kg	859.37	3.01	2586.72	2586.72	
6.00.00	OTROS						
6.00.01	LIMPIEZA FINAL DE TERRENO	M2	9.00	1.40	12.60	12.60	
SUB TOTAL						6260.15	
					UTILIDAD	10%	626.01
					GASTOS GENERALES	18%	1129.33
TOTAL EN US\$.						8,015.50	

SON: OCHO MIL QUINCE CON 50/100 DOLARES AMERICANOS

- Nota:** - La Empresa Incimmet realizara el trabajo a todo costo.
 - El traslado de agregado se realizara previa coordinación con compañía.

Tabla 22.

Precios unitarios de diseño de tapón de desmonte de mina más piedra

ESTRUCTURA DE PRECIOS UNITARIOS			
PARTIDA :	PREPARACIÓN DE DIQUE PARA TAJO	RENDIMIENTO:	0.50 und
SECCIÓN:	5.0 x 4.5	LONGITUD DE BARRA:	
GRADIENTE:	0.00%	LONGITUD EFECTIVA:	
UNIDAD DE MEDIDA :	UND	EFICIENCIA DE VOLADURA:	
ELABORADO POR:	INCIMMET S.A.	N° TALADROS PERFORADOS:	
UNIDAD DE PRODUCCIÓN :	DIQUE TAPÓN	N° TALADROS DISPARADOS:	
TIPO DE MATERIAL :	DESMONTE	HORAS POR GUARDIA:	10.15
DUREZA DE MATERIAL :	MEDIA	DENSIDAD DE MATERIAL:	2.70
INCLUYE :	Enmallado, Entelado, Enrocado, Manitou y operador		
NO INCLUYE:	No incluye Scooptram ni operador		
UNIDADES MES:	15		
FECHA DE ELABORACION :			

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UND.	INCIDENCIA	P.U (US\$)	PARCIAL	S-TOTAL	TOTAL
1	MANO DE OBRA							
	Supervisor	1	30.45	Hr.	100%	3.90	118.79	237.58
	Operador Manitou	1	30.45	Hr.	100%	2.76	84.15	168.30
	Maestro Desatador / Cargador/Dispar	2	60.90	Hr.	100%	2.33	141.65	283.30
	Ayudante Desatador/ Cargador/Dispar	2	60.90	Hr.	100%	2.06	125.66	251.32
	Inspector de Seguridad	1	30.45	Hr.	100%	3.46	105.47	210.94
								1,151.43
2	MATERIALES							
	Malla Electrosoldada	0.0	ml		-	-	-	-
	Broca Taladro de 3/8"	1.0	Und		0.08	0.08	0.17	
	Clavos de 4"	0.0	Kg.		-	-	-	-
	Clavos de 5"	0.0	Kg.		-	-	-	-
	Tarugos de 1/2"	0.0	Und		-	-	-	-
	Alambre	0.0	Kg.		-	-	-	-
	Cemento tipo V	16.0	Bols.		9.83	157.28	314.56	
	Arena gruesa	1.8	m3		31.82	57.27	114.55	
								429.27
3	Herramientas y EPP							
	Implementos de Seguridad	6	182.70	H.H	0.45	82.39	164.78	
	Herramientas		40.60	H.H	0.88	35.84	71.68	
	Lámparas mineras	6	6.00	Und/Gdia	0.24	1.42	2.83	
	Protocolo de seguridad	6	182.70	H.H	0.33	60.70	121.41	
								360.70
4	EQUIPOS							
	Manitou		6.00	H.maq	46.00	276.00	552.01	
	Camioneta	1	30.00	Día	112.00	3,360.00	224.00	
	Taladro Manual	1	4.00	H.maq	0.95	3.80	7.60	
								783.61
COSTO DIRECTO								2,725.01
GASTOS GENERALES		19.8%						540.47
CONTINGENCIA		5.0%						136.25
UTILIDAD		10.0%						272.50
COSTO TOTAL		US\$ /ML						3,674.23

CONSIDERACIONES

1. Scooptram traslado de agregados responsabilidad Nexa / Si se utiliza equipo INCIMMET será reconocido como Horas Alquiler
2. Cemento y arena a cuenta de Incimmet; materiales adicionales a cuenta de Nexa
3. Movimiento de materiales será con recurso del área de tuberías (Servicio de Alquiler y Operación de Equipos)
4. Contingencia por personal observado (alimentación, movilidad, habitabilidad, lavandería, desinfección)

Tabla 23.

Precios unitarios de diseño de tapón de desmonte de mina más puntales de madera

ESTRUCTURA DE PRECIOS UNITARIOS			
PARTIDA :	PREPARACIÓN DE TAPÓN CON MADERA PARA TA.	RENDIMIENTO:	0.50 und
SECCIÓN:	5.0 x 4.5	LONGITUD DE BARRA:	
GRADIENTE:	0.00%	LONGITUD EFECTIVA:	
UNIDAD DE MEDIDA :	UND	EFICIENCIA DE VOLADURA:	
ELABORADO POR:	INCIMMET S.A.	Nº TALADROS PERFORADOS:	
UNIDAD DE PRODUCCION :	TAPÓN CON MADERA	Nº TALADROS DISPARADOS:	
TIPO DE MATERIAL :	DESMONTE / MADERA		
DUREZA DE MATERIAL :	MEDIA	HORAS POR GUARDIA:	10.15
INCLUYE :	Trabajos de Carpintería	DENSIDAD DE MATERIAL:	2.70
NO INCLUYE:	No incluye Scooptram ni operador		
UNIDADES MES:	15		
FECHA DE ELABORACION :			

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UND.	INCIDENCIA	P.U (US\$)	PARCIAL	S-TOTAL	TOTAL
1	MANO DE OBRA							
	Supervisor	1	30.45	Hr.	100%	3.90	118.79	237.58
	Maestro Desatador / Cargador/Dispar	2	60.90	Hr.	100%	2.33	141.65	283.30
	Ayudante Desatador/ Cargador/Dispar	2	60.90	Hr.	100%	2.06	125.66	251.32
	Inspector de Seguridad	1	30.45	Hr.	100%	3.46	105.47	210.94
								983.13
2	MATERIALES							
	Tablas de Madera 2"x10"x 10'	14.0	Und		11.30	158.20	316.40	
	Puntales de 4" (Redondos)	6.0	Und		18.65	111.90	223.80	
	Clavos de 4"	4.0	Kg.		3.95	15.80	31.60	
	Clavos de 5"	4.0	Kg.		3.50	14.00	28.00	
	Listones de 4"x3"x10'	8.0	Und		10.23	81.84	163.68	
	Alambre	0.0	Kg.		-	-	-	
	Cemento tipo V	9.0	Bols.		9.83	88.47	176.94	
	Arena gruesa	1.0	m3		31.82	31.82	63.64	
								1,004.06
3	Herramientas y EPP							
	Implementos de Seguridad	5	152.25	H.H	0.45	68.66	137.32	
	Herramientas		40.60	H.H	0.88	35.84	71.68	
	Lámparas mineras		5.00	Und/Gdia	0.24	1.18	2.36	
								211.36
4	EQUIPOS							
	Camioneta	1	30.00	Día	112.00	3,360.00	224.00	
	Taladro Manual	1	2.00	H.maq	0.95	1.90	3.80	
								227.80
COSTO DIRECTO								2,426.34
GASTOS GENERALES		19.8%						481.24
CONTINGENCIA		5.0%						121.32
UTILIDAD		10.0%						242.63
COSTO TOTAL		US\$ /ML						3,271.53

CONSIDERACIONES

1. Los taponos con refuerzo de madera seran considerados en los topeos, mas no en la zonas inferiores de los tajos.
2. Los taponos de madera seran considerados de acuerdo a la necesidad y aprobación de parte del cliente Nexa.
3. Los materiales seran trasladados en coordinación con la CIA Nexa.
4. Contingencia por personal observado (alimentación, movilidad, habitabilidad, lavanderia, desinfección)

b) Costos de producción de dique tapón

Los costos de producción de diques tapón en sus distintos diseños fueron de US \$ 2'930,080.40 durante el periodo 2019 y de US \$ 1'651,361.70 para el periodo enero a setiembre del 2020.

Tabla 24.
Costos de producción de dique tapón durante el periodo 2019, unidad minera Cerro Lindo

		PRODUCCIÓN DIQUES - 2019			COSTOS - 2019		
		DIQUE MURO DE CONCRETO	DIQUES TAPÓN DESMONTE	DIQUE TAPÓN MADERA	DIQUE MURO DE CONCRETO	DIQUES TAPÓN DESMONTE	DIQUE TAPÓN MADERA
2019	Enero	25	4	2	200,387.50	14,696.92	6,543.06
2019	Febrero	29	6	0	232,449.50	22,045.38	0.00
2019	Marzo	26	5	1	208,403.00	18,371.15	3,271.53
2019	Abril	29	7	0	232,449.50	25,719.61	0.00
2019	Mayo	28	5	3	224,434.00	18,371.15	9,814.59
2019	Junio	24	6	0	192,372.00	22,045.38	0.00
2019	Julio	27	7	0	216,418.50	25,719.61	0.00
2019	Agosto	28	8	2	224,434.00	29,393.84	6,543.06
2019	Setiembre	28	6	0	224,434.00	22,045.38	0.00
2019	Octubre	30	7	2	240,465.00	25,719.61	6,543.06
2019	Noviembre	25	8	3	200,387.50	29,393.84	9,814.59
2019	Diciembre	26	7	1	208,403.00	25,719.61	3,271.53
TOTAL 2019		325	76	14	2,605,037.50	279,241.48	45,801.42

Tabla 25.
Costos de producción de dique tapón durante el periodo 2020, unidad minera Cerro Lindo

		PRODUCCIÓN DIQUES - 2020			COSTOS - 2020		
		DIQUE MURO DE CONCRETO	DIQUES TAPÓN DESMONTE	DIQUE TAPÓN MADERA	DIQUE MURO DE CONCRETO	DIQUES TAPÓN DESMONTE	DIQUE TAPÓN MADERA
2020	Enero	24	9	1	192,372.00	33,068.07	3,271.53
2020	Febrero	25	9	0	200,387.50	33,068.07	0.00
2020	Marzo	16	15	0	128,248.00	55,113.45	0.00
2020	Abril	0	16	3	0.00	58,787.68	9,814.59
2020	Mayo	7	11	4	56,108.50	40,416.53	13,086.12
2020	Junio	25	5	0	200,387.50	18,371.15	0.00
2020	Julio	21	8	0	168,325.50	29,393.84	0.00
2020	Agosto	19	15	0	152,294.50	55,113.45	0.00
2020	Setiembre	19	14	0	152,294.50	51,439.22	0.00
TOTAL 2020		156	102	8	1,250,418.00	374,771.46	26,172.24

c) Análisis económico de la producción de dique tapón

- ✓ La producción total de diques tapón durante el periodo 2019 fue de 415 unidades, considerando 325 unidades de dique muro de concreto, 76 unidades de dique tapón de desmonte y 14 unidades de dique tapón de madera.
- ✓ La producción total de diques tapón durante el periodo enero a setiembre del 2020 fue de 266 unidades, considerando 156 unidades de dique muro de concreto, 102 unidades de dique tapón de desmonte y 8 unidades de dique tapón de madera.
- ✓ Los costos totales de diques tapón durante el periodo 2019 fue de US \$ 2'605,037.50 en dique muro de concreto, US \$ 279,241.48 en dique tapón de desmonte y US \$ 45,801.42 en dique tapón de madera.

- ✓ Los costos totales de diques tapón durante el periodo enero a setiembre del 2020 fue de US \$ 1'250,418.00 en dique muro de concreto, US \$ 374,771.46 en dique tapón de desmonte y US \$ 26,172.24 en dique tapón de madera.
- ✓ El costo unitario de dique tapón considera US \$ 8,016 a dique muro de concreto, US \$ 3,674 a dique tapón de desmonte y US \$ 3,272 a dique tapón de madera.
- ✓ El análisis de incidencia en el uso de los diferentes diseños de diques tapón usados en el método de minado *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro Lindo, se asume el de menor costo y flexibilidad en el programa avance de minado, considerando el diseño de dique tapón de desmonte.
- ✓ De acuerdo a la flexibilidad de diseño y costo, se viene incrementando el uso del dique tapón de desmonte, en referencia a los diques muro de concreto y dique de madera.
- ✓ Durante el periodo 2019 y enero a setiembre del 2020 se incrementó el uso del dique tapón de desmonte en 34.5% durante el mismo periodo operacional.
- ✓ Así mismo, durante el mismo periodo 2019 y enero a setiembre del 2020 hubo una disminución del uso del dique muro de concreto en 64% durante el mismo periodo operacional.
- ✓ Esta reducción del uso del dique muro de concreto durante el periodo 2020 es producto del incremento de costos de la sobreexcavación de los tajeos por efecto de la voladura, para minimizar la frecuencia de construcción de los tapones tipo V.

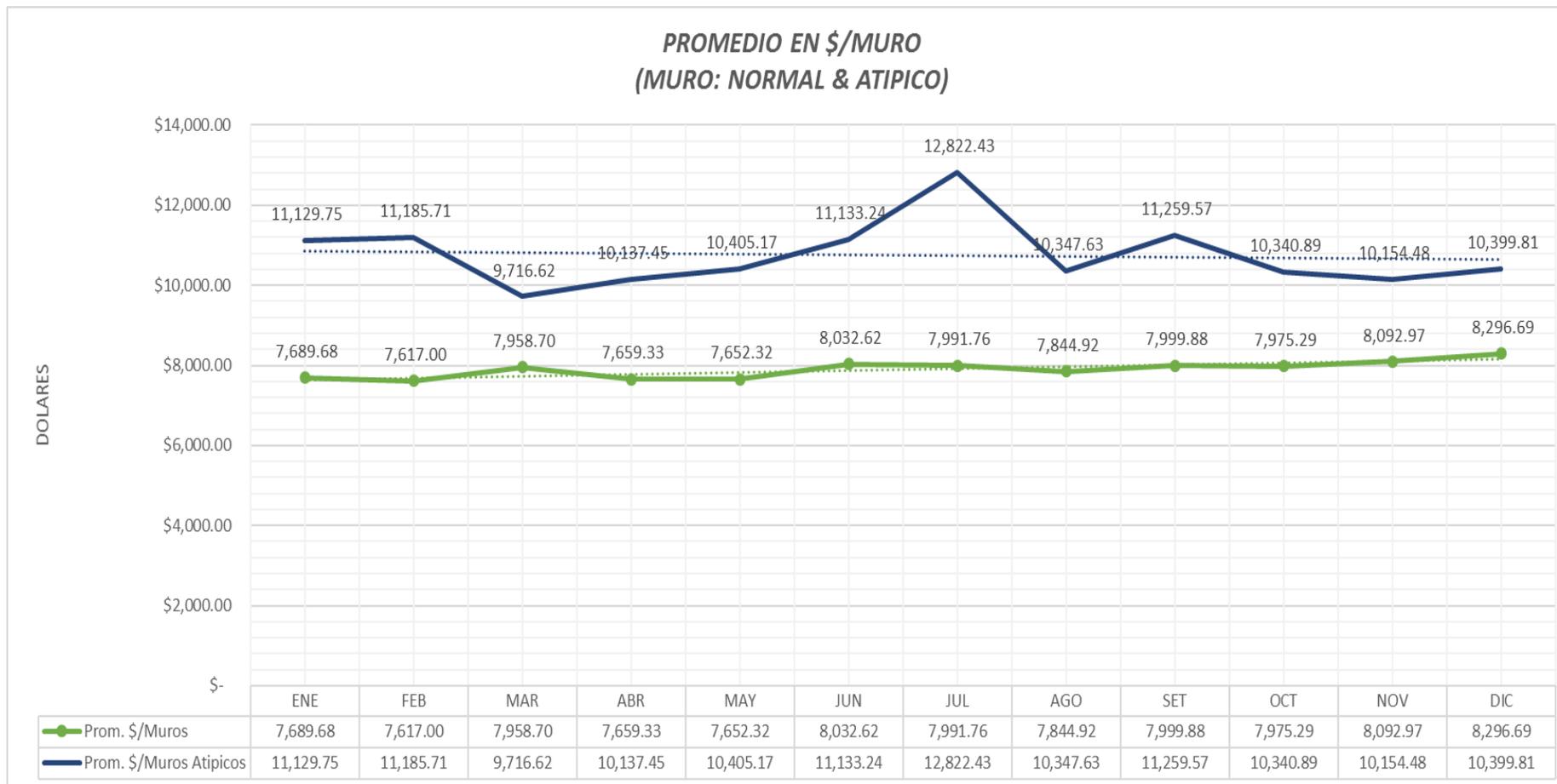


Figura 53. Promedio muro de concreto con incremento de costos por sobre excavación de los tajeos por voladura

4.6. Análisis de reducción de costos mediante el uso de dique tapón de desmonte

La reducción de costos producto del análisis de diseño y costos unitarios de los diques tapón de muro de concreto, dique tapón de desmonte y dique tapón de madera permitió tener una visión más amplia de la influencia de los diferentes diseños de diques tapón a ser usados en el método de minado *sublevel stoping* y por ende en el costo de mina.

Durante el periodo 2019, se construyeron un total de 415 diques tapón con una incidencia de uso para el método de minado *sublevel stoping* con el 78% para dique muro de concreto, con el 18% para dique tapón de desmonte y 3% para dique tapón de madera.

Durante el periodo enero a setiembre del 2020, se construyeron un total de 266 diques tapón con una incidencia de uso para el método de minado *sublevel stoping* con el 59% para dique muro de concreto, con el 38% para dique tapón de desmonte y 3% para dique tapón de madera.

Este porcentaje de menor incidencia de construcción de dique muro de concreto en 64% y un incremento sustancial mayor en 34% de construcción de dique tapón de desmonte entre ambos periodos, permite un descenso sustancial de los costos de mina.

Tabla 26.
Productividad dique tapón, periodo 2019 a 2020, unidad minera Cerro Lindo

MINA PRODUCCION															
Productividad Dique Tapón 2019 - 2020															
Area	CeCo	Actividad	Descripción	ene-19	feb-19	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19
Mina Producción	Planta de pasta y relleno	Relleno en Pasta	Construcción de Muros	221,627	254,495	230,046	258,169	252,620	214,417	242,138	260,371	246,479	272,728	239,596	237,394
PRODUCTIVIDAD (US \$ / Ton) - 2019				0.36	0.42	0.38	0.41	0.41	0.34	0.39	0.41	0.39	0.45	0.38	0.39
Area	CeCo	Actividad	Descripción	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20
Mina Producción	Planta de pasta y relleno	Relleno en Pasta	Construcción de Muros	228,712	233,456	183,361	68,602	109,611	218,759	197,719	207,408	203,734			
PRODUCTIVIDAD (US \$ / Ton) - 2020				0.38	0.38	0.30	0.11	0.18	0.35	0.32	0.33	0.32			

Tabla 27.
Producción periodo 2020, unidad minera Cerro Lindo

MINA PRODUCCION														
ITEM	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	jul-20	ago-20	sep-20	oct-20	nov-20	dic-20	2020	
Tratamiento Planta	TM	609,000	609,000	609,000	630,000	609,000	630,000	621,200	633,000	633,000	611,900	633,000	611,900	7,440,000
Ton Tratadas x día	TPD	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,058	21,100	21,100	21,100	21,100	21,100	21,047
Total Paradas	días	2	0	2	0	2	0	2	1	0	2	0	2	13
Días Operativos Planta	días	29	29	29	30	29	30	30	30	30	29	30	29	354
Eficiencia Planta	%	94%	104%	94%	100%	94%	100%	95%	97%	100%	94%	100%	94%	97%

La productividad asociada al costo de dique tapón con el tonelaje producido durante periodo 2019 fue de 0.40 US \$/ t, y la productividad del costo de dique tapón con el tonelaje producido durante el periodo enero a setiembre del 2020 es de 0.32 US \$ /t, producto de un mayor diseño del dique tapón de desmante comparado con el dique muro de concreto.

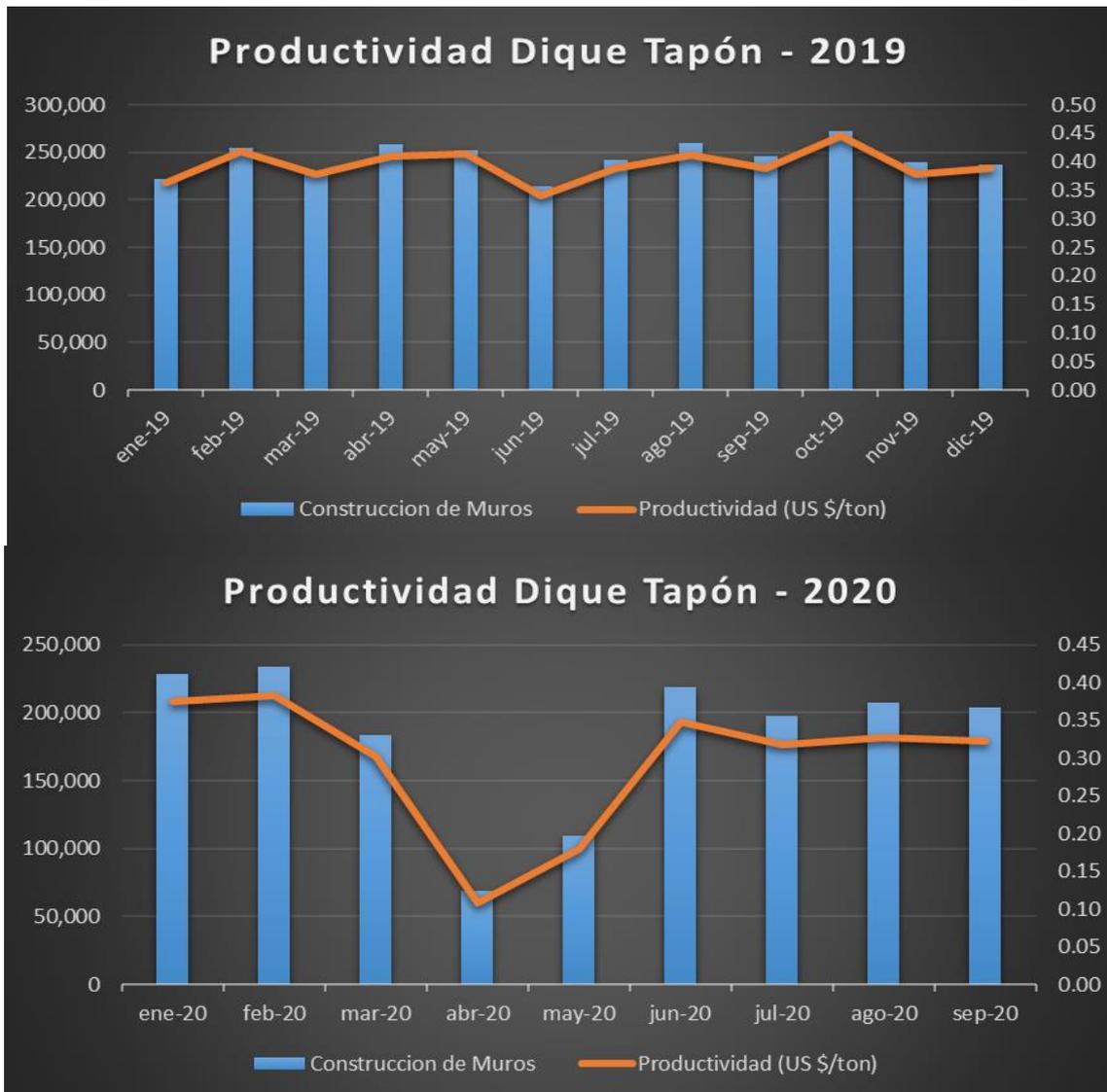


Figura 54. Productividad de dique tapón periodo 2019 a 2020, unidad minera Cerro Lindo

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los estudios realizados se describen los costos unitarios de los diques tapón de muro de concreto, tapón de desmonte y tapón de madera, considerando un análisis de producción de diques durante el periodo 2019 y 2020, analizando su incidencia en el costo del método de minado *sublevel stoping*.
2. Los costos unitarios a junio del 2020 de diques tapón de muro de concreto, tapón de desmonte y tapón de madera, son US \$ 8015.50, US \$ 3674.23 y US\$ 3271.53 respectivamente.
3. Los costos de producción de diques tapón en sus distintos diseños fueron de US \$ 2'930,080.40 durante el periodo 2019 y de US \$ 1'651,361.70 para el periodo enero a setiembre del 2020.
4. La producción total de diques tapón durante el periodo 2019 fue de 415 unidades, considerando 325 unidades de dique muro de concreto, 76 unidades de dique tapón de desmonte y 14 unidades de dique tapón de madera.
5. La producción total de diques tapón durante el periodo enero a setiembre del 2020 fue de 266 unidades, considerando 156 unidades de dique muro de concreto, 102 unidades de dique tapón de desmonte y 8 unidades de dique tapón de madera.
6. Los costos totales de diques tapón durante el periodo 2019 fue de US \$ 2'605,037.50 en dique muro de concreto, US \$ 279,241.48 en dique tapón de desmonte y US \$ 45,801.42 en dique tapón de madera.
7. Los costos totales de diques tapón durante el periodo enero a setiembre del 2020 fue de US \$ 1'250,418.00 en dique muro de concreto, US \$ 374,771.46 en dique tapón de desmonte y US \$ 26,172.24 en dique tapón de madera.
8. Los costos unitarios de dique tapón es de US \$ 8,016 de dique muro de concreto, US \$ 3,674 de dique tapón de desmonte y US \$ 3,272 de dique tapón de madera.
9. El análisis de incidencia en el uso de los diferentes diseños de diques tapón usados en el método de minado *sublevel stoping* en la unidad minera Cerro

Lindo, se asume el de menor costo y flexibilidad en el programa avance de minado, considerando el diseño de dique tapón de desmonte.

10. De acuerdo a la flexibilidad de diseño y costo, se viene incrementando el uso del dique tapón de desmonte, en referencia a los diques muro de concreto y dique de madera.
11. Durante el periodo 2019 y enero a setiembre del 2020 se incrementó el uso del dique tapón de desmonte en 34.5% durante el mismo periodo operacional.
12. Así mismo, durante el mismo periodo 2019 y enero a setiembre del 2020 hubo una disminución del uso del dique muro de concreto en 64% durante el mismo periodo operacional.
13. Durante el periodo 2019, se construyeron un total de 415 diques tapón con una incidencia de uso para el método de minado *sublevel stoping* con el 78% para dique muro de concreto, con el 18% para dique tapón de desmonte y 3% para dique tapón de madera.
14. Durante el periodo enero a setiembre del 2020, se construyeron un total de 266 diques tapón con una incidencia de uso para el método de minado *sublevel stoping* con el 59% para dique muro de concreto, con el 38% para dique tapón de desmonte y 3% para dique tapón de madera.
15. Este porcentaje de menor incidencia de construcción de dique muro de concreto en 64% y un incremento sustancial mayor en 34% de construcción de dique tapón de desmonte entre ambos periodos, permite un descenso sustancial de los costos de mina.
16. Finalmente, la productividad asociada al costo de dique tapón con el tonelaje producido durante periodo 2019 fue de 0.40 US \$/ t, y la productividad del costo de dique tapón con el tonelaje producido durante el periodo enero a setiembre del 2020 es de 0.32 US \$ /t, producto de un mayor diseño del dique tapón de desmonte comparado con el dique muro de concreto.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda controlar la sobreexcavación en los tajeos por efecto de la voladura, para minimizar la frecuencia de construcción de los tapones tipo V en la construcción de diques de muro de concreto e incrementar los costos de diseño.
2. De acuerdo a lo descrito en los diferentes diques tapón, se recomienda el uso de la siguiente secuencia de llenado, el mismo que deberá ser validado con los resultados de instrumentación de presiones sobre el tapón.
3. Se recomienda realizar un análisis comparativo (*benchmarking*) externo con otras unidades mineras y comparar las mejores prácticas referente a los diques tapón usados en el método de minado *sublevel stoping*.
4. Se recomienda realizar la evaluación geomecánica después de cada explotación del tajo, para evaluar el comportamiento del tajo vacío, por un tema de desprendimiento y plantear la edificación del tapón ya sea de concreto o desmonte.
5. Se recomienda no realizar voladuras en un radio no menor a 50 metros cuando los tajos se encuentren en un proceso de relleno, ya que estas voladuras debilitan los muros de concreto armado o los diques tapón.
6. En el proceso de relleno de tajos se recomienda controlar el proceso de las fases de relleno con 5% de cemento en los primeros 5 metros de altura del tajo, hasta la corona de la labor inferior, así mismo, controlar el tiempo de fraguado en cada fase para evitar sobreesfuerzos en los tapones de tener algún desprendimiento al interior del tajo.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **LARA JIMÉNEZ, Widmer Víctor.** *Diseño de muros de concreto armado en ventanas para optimizar relleno de tajos vacíos - U. M. Cerro Lindo – Compañía Minera Mllpo S. A. A. Huancayo : Repositorio - UNCP, 2019.*
2. **VILLEGAS LANDA, Luis.** *Relleno en pasta utilizado en la mina Iscaycruz .* Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, 2006. Informe de ingeniería para titulación.
3. **LAIN HUERTA, Carlos.** *Estudio de las distribuciones tensionales y de las resistencias de los rellenos de pasta de la mina subterránea de aguas teñidas.* Madrid : Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
4. **PENGYU, Yang.** *Stability analyses of waste rock barricades designed to retain paste backfill.* s.l. : International Journal of Geomechanics, 2016.
5. **HOEK, CARRANZA-TORRES y CORKUM.** *Criterios de falla del macizo rocoso.* 2002.
6. **DEERE, Miller.** *Correlación para la obtención del módulo de Young.* 1966.
7. **ROBERTSON.** *Handled RQD (HRQD) o RQD de manipuleo.* 1988.
8. **BIENIAWSKI, Z.** *El sistema de clasificación RMR89.* 1989.
9. **BIRON, C. et al.** *Diseño de ademes en mina.*

ANEXOS

Anexo A

Matriz de operacionalización de variables

Tabla 28.

Matriz de operacionalización de variables

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables e indicadores
<p>Problema principal ¿Cuál es el resultado del análisis de los diferentes diques tapón aplicados en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> para la reducción de costos en la unidad minera Cerro Lindo?</p> <p>Problemas específicos c) ¿Cómo aplicar los criterios del diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo? d) ¿Cómo mejorar la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo?</p>	<p>Objetivo general Desarrollar una metodología para incorporar variables de diseño operacional en el dique tapón para la reducción de costos en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo.</p> <p>Objetivos específicos c) Determinar los criterios de diseño operacional en el dique tapón, en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo. d) Determinar la mejora de la productividad y reducción de costos en el diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> en la unidad minera Cerro Lindo.</p>	<p>Hipótesis general Al analizar las diferentes variables operacionales del diseño del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i>, permite disminuir significativamente los costos de minado en la unidad minera Cerro Lindo.</p> <p>Hipótesis específicas c) La realización eficiente de los criterios de diseño operacional en el dique tapón permitirá controlar la mejora de la productividad en el método de explotación <i>sublevel stoping</i>, en la unidad minera Cerro Lindo. d) El cumplimiento seguro y eficiente del dique tapón en el método de explotación <i>sublevel stoping</i> de la unidad minera Cerro Lindo permitirá la mejora de la productividad y reducción de costos en el ciclo de minado.</p>	<p>Variable independiente Método de minado <i>sublevel stoping</i></p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geológico • Geomecánico <p>Variable dependiente Análisis de dique tapón</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geometría de diseño (mt) • Tapones de contención • Características técnicas de dique tapón • Producción de dique tapón • Análisis económico

Anexo B

Planos de geomecánica y ciclo de minado

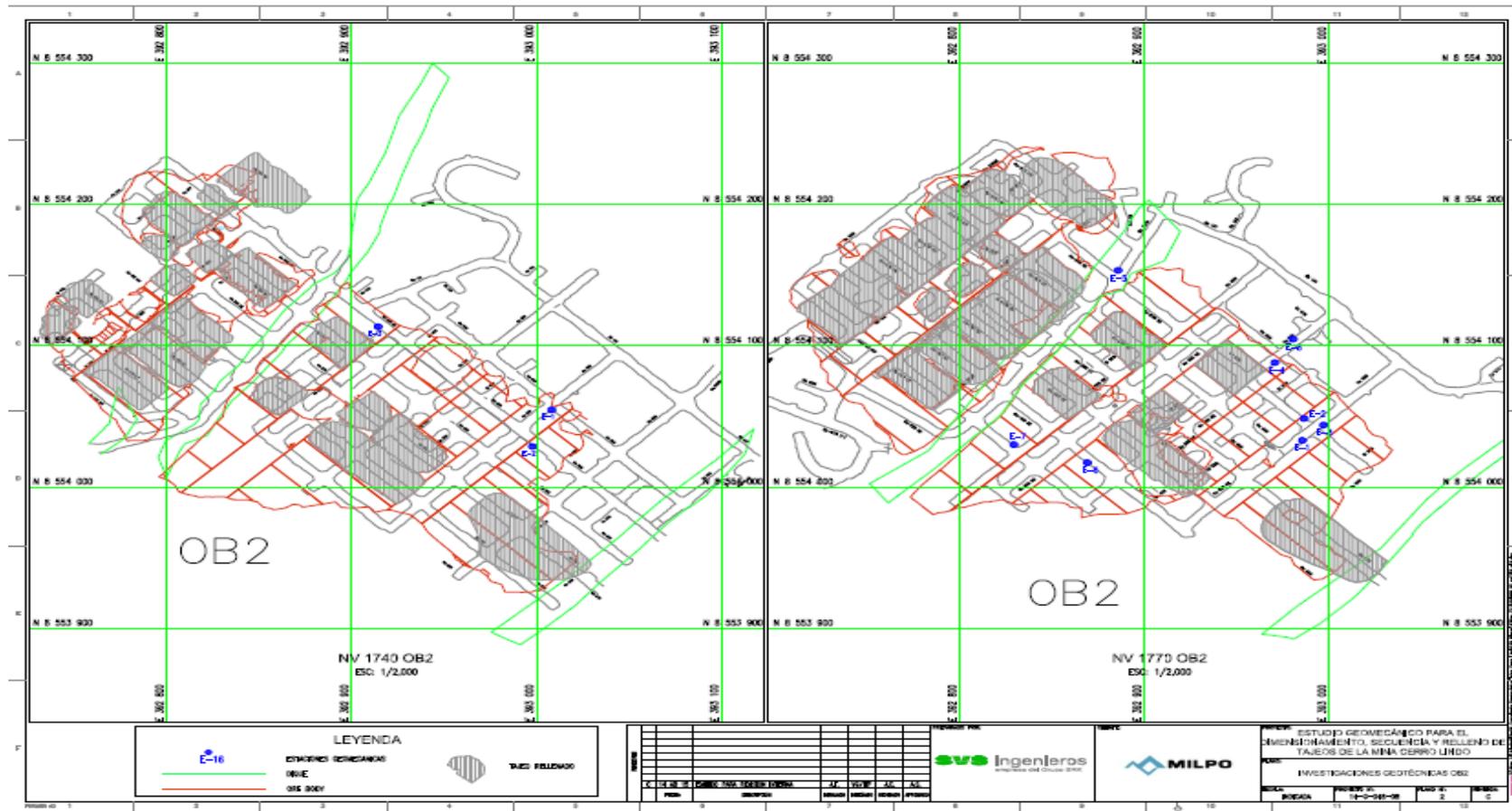


Figura 55. Plano en planta del ore body OB 2, unidad minera Cerro Lindo

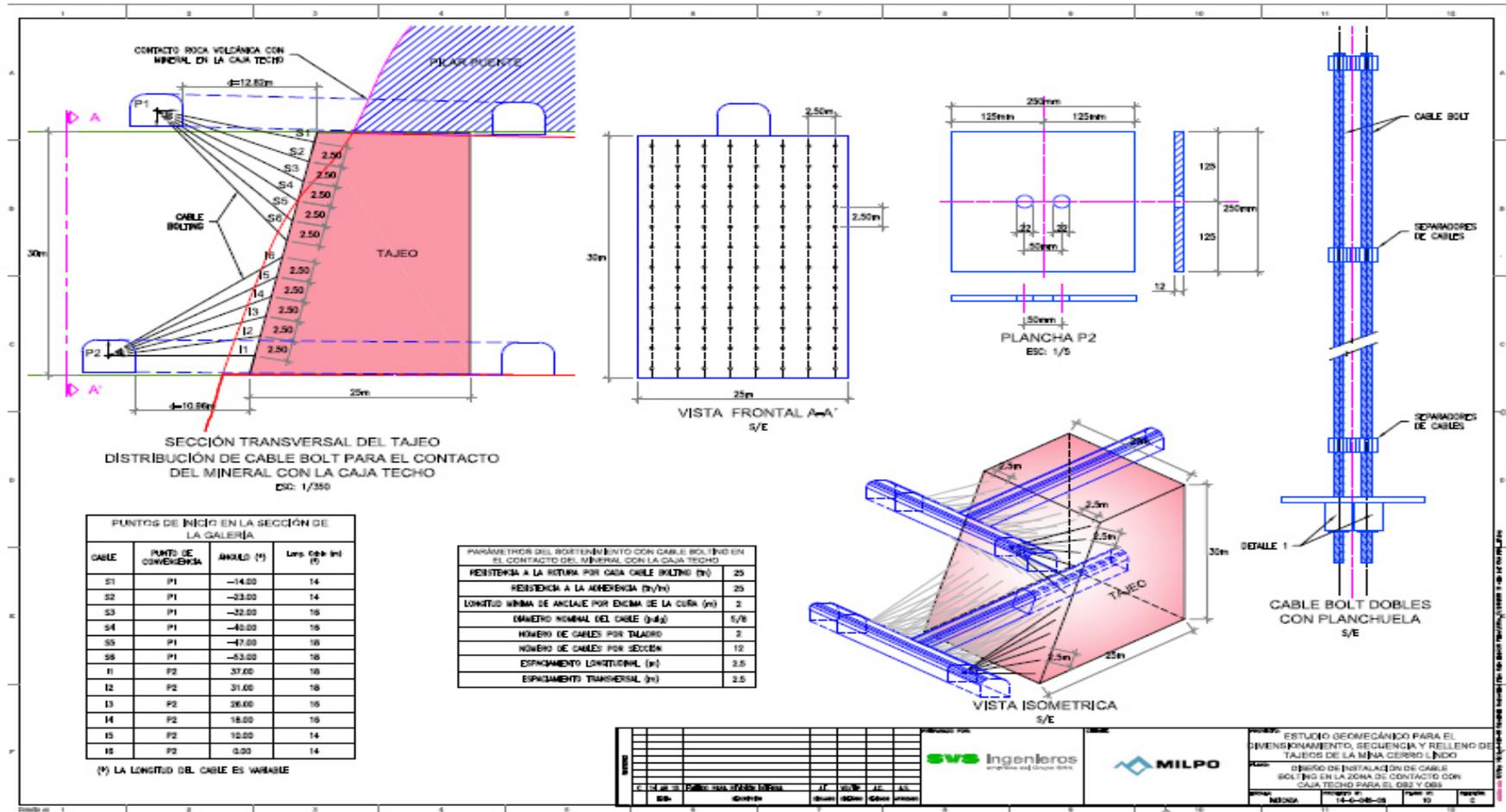


Figura 57. Plano de cable bolting, aplicado en tajeos, unidad minera Cerro Lindo

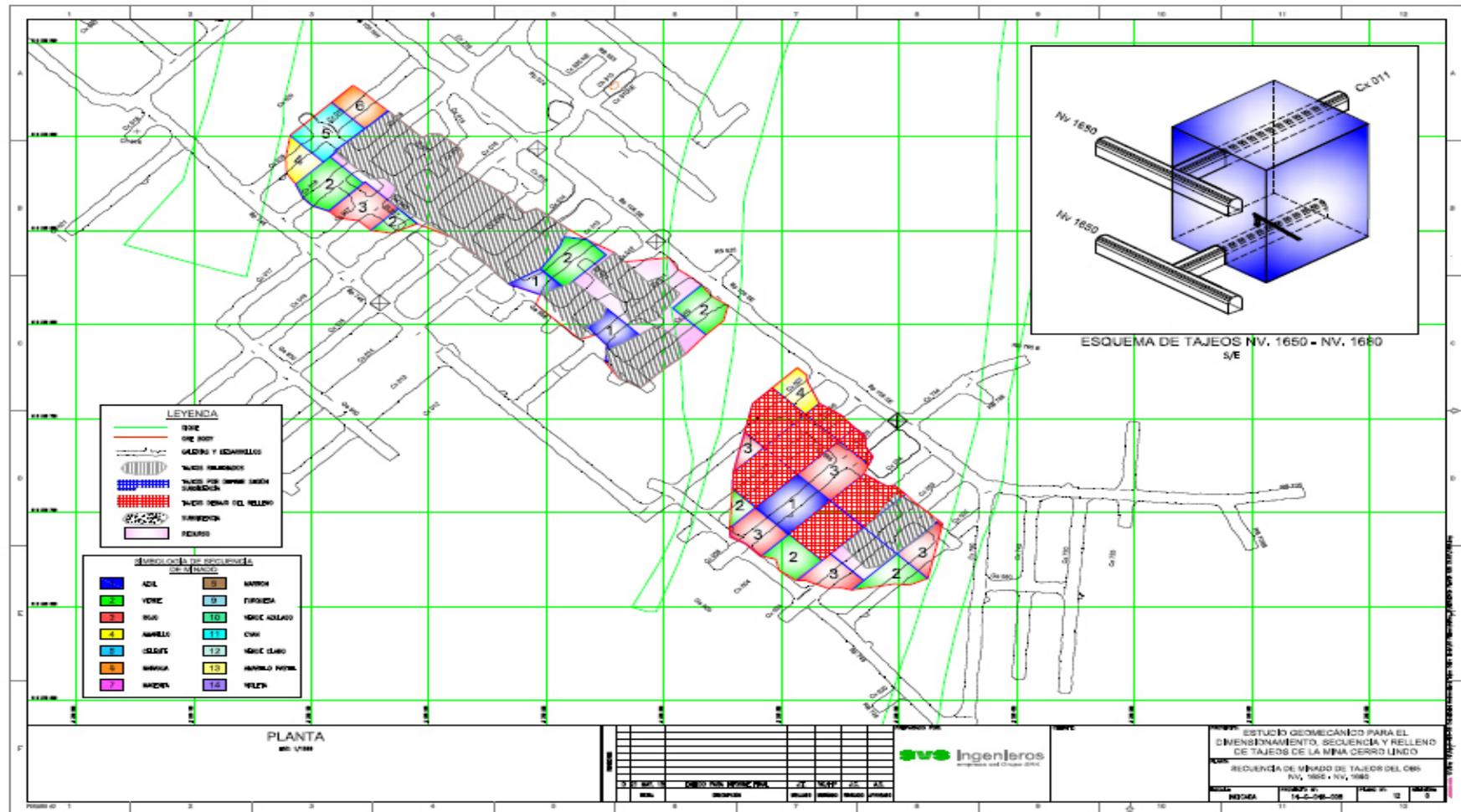


Figura 58. Plano de secuencia de minado de tajeros, ore body 5, unidad minera Cerro Lindo

Anexo C

Secuencia de minado

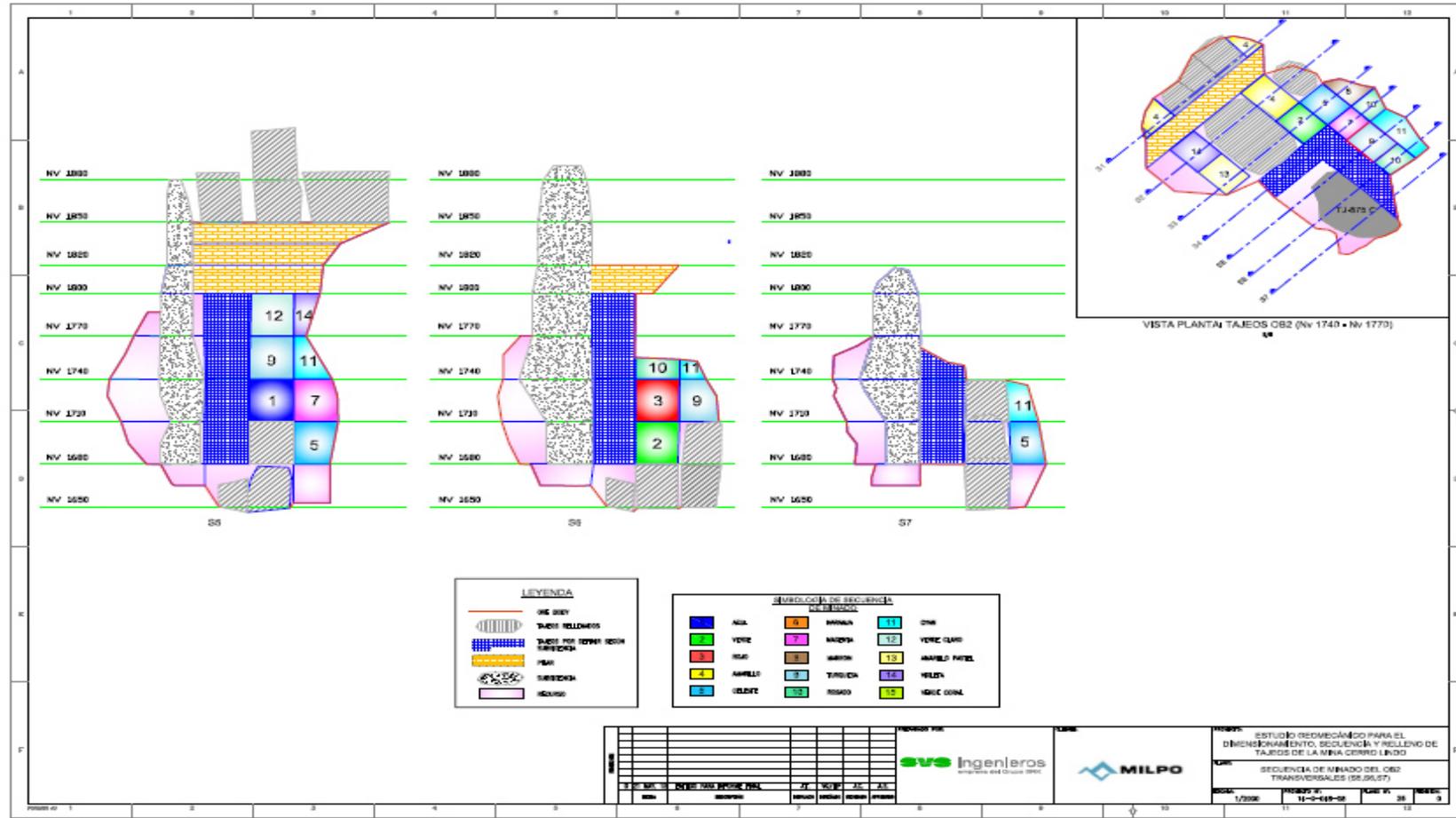


Figura 59. Plano de secuencia de minado de tajeos, ore body 2, unidad minera Cerro Lindo

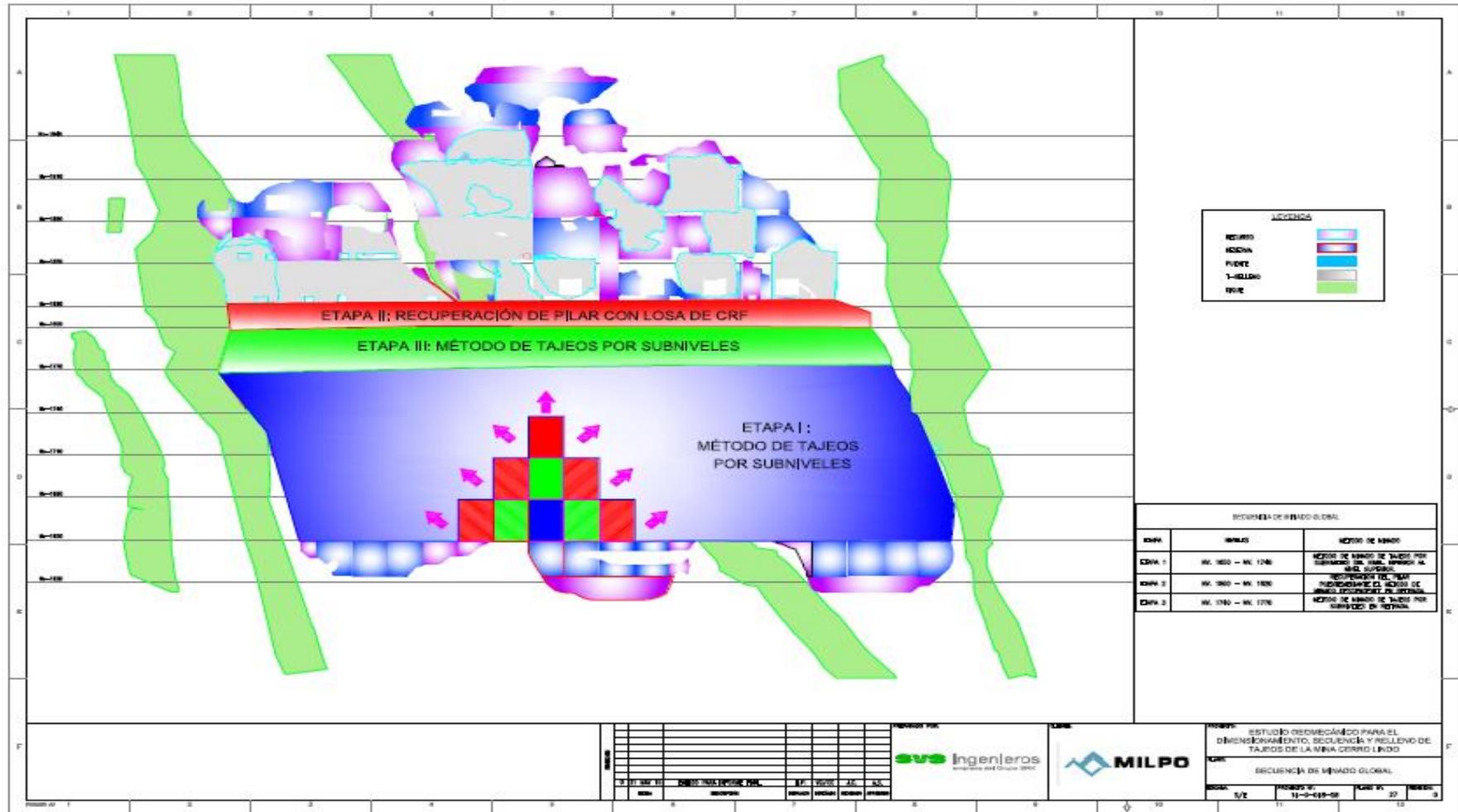


Figura 60. Plano de secuencia de minado sublevel stoping, unidad minera Cerro Lindo

Anexo D

Dique tapón desmonte

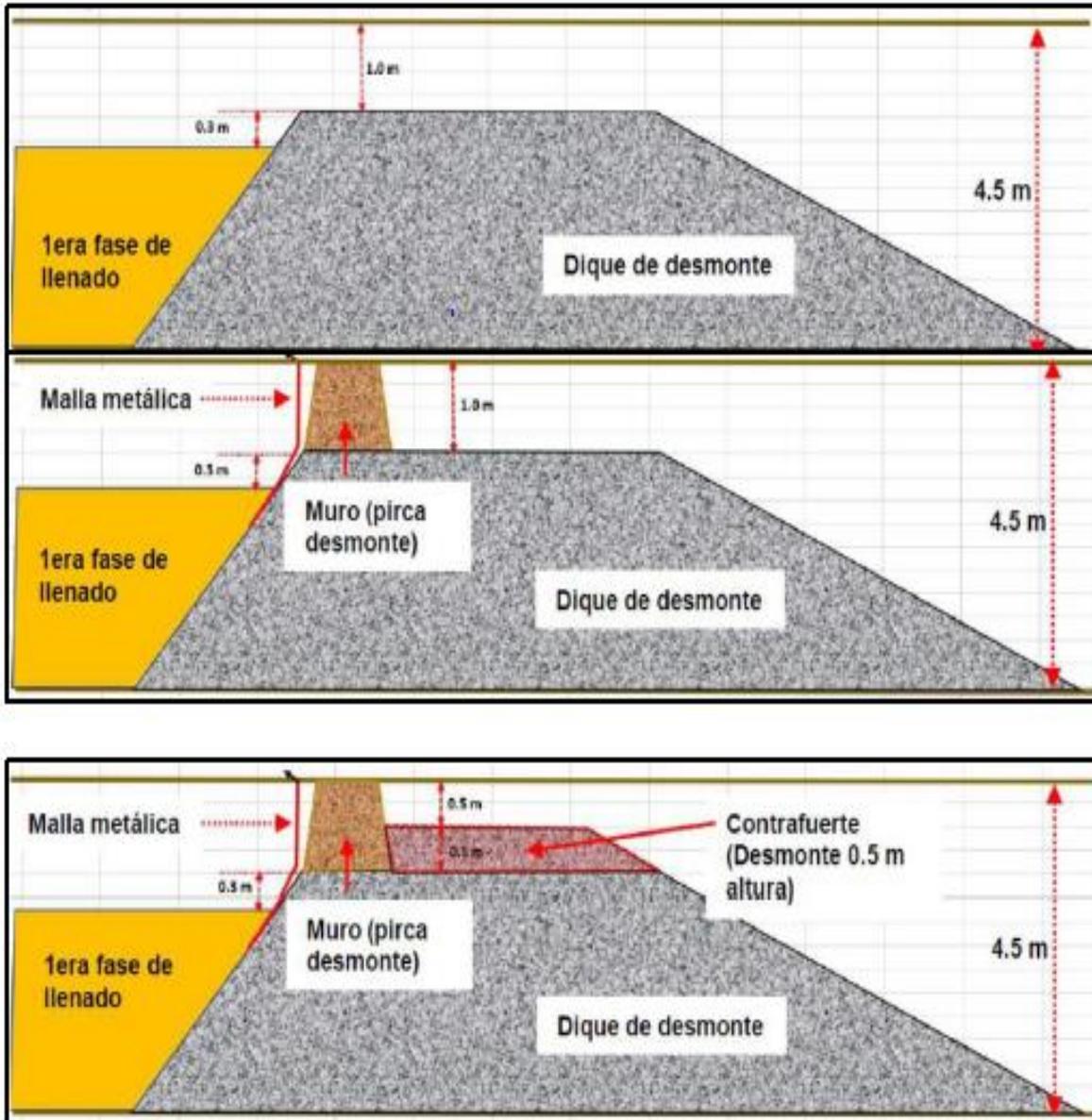


Figura 61. Diseño de dique tapón de desmonte, unidad minera Cerro Lindo