



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

DISEÑO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA PANEL CAVING INCLINADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ROBERTO MATÍAS ZAPATA VILLASEÑOR

PROFESOR GUÍA:

ERNESTO WILLIAM ARANCIBIA VILLEGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARCO ESTEBAN VERA HENRÍQUEZ
JAVIER ANDRES VALLEJOS MASSA

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el diseño de un Panel Caving Inclinado sobre un yacimiento a alta profundidad y una buena calidad de roca, con el objetivo de extender los pilares de producción mejorando así la estabilidad general de este. Desde un principio solo se consideran aspectos claves del diseño para luego realizar un análisis comparativo en términos económicos y de estabilidad.

El diseño considera la realización de la socavación mediante el método de Sublevel Caving de manera longitudinal al yacimiento para luego efectuar la extracción continua por detrás del frente de hundimiento mediante estocadas orientadas perpendiculares a las galerías del Sublevel Caving. Las estocadas están conectadas con calles de producción, las cuales son paralelas a las galerías del Sublevel Caving en cada nivel de extracción. Ya que el método no restringe el largo para el carguío se considerarán galerías de 5 x 4.5 metros (ancho x alto) para permitir el tránsito de los equipos LHD de 15.2 yd³.

El diseño posee principalmente dos parámetros que afectan la estabilidad y los costos. En primer lugar la distancia vertical entre niveles afecta el ángulo de inclinación global del sistema y las perforaciones de hundimiento, por lo cual, se decide fijar en 20 metros este valor para así obtener un ángulo global de 49° y una longitud de perforación máxima de 37 metros. El segundo parámetro clave es el largo de la estocada de carguío, un aumento en el largo de esta aumenta a su vez el largo del pilar, otorgándole así una mayor resistencia, sin embargo, aumenta también la cantidad de desarrollos mineros y la distancia recorrida por los equipos LHD, lo que implica costos de inversión y operación más altos. Finalmente se decide establecer un largo de estocada de 30 metros para balancear los efectos antes mencionados.

El análisis económico refleja que la inversión en el sistema inclinado es 366 [US\$/m²] más cara que el Panel Caving Convencional. El costo de operación de ambos sistemas es similar, pues a pesar de que los equipos LHD recorren una mayor distancia en el método inclinado, el rendimiento de estos contrarresta este efecto.

Finalmente el análisis comparativo de estabilidad se realiza en tres dimensiones para reflejar las singularidades del método, obteniéndose que el Panel Caving Convencional posee mejores indicadores de estabilidad en las galerías de hundimiento, estocadas y pilares de producción, lo cual se debe principalmente a que la infraestructura minera de un Panel Caving Inclinado se encuentra expuesta al esfuerzo principal intermedio.

ABSTRACT

In this work, a design of an Inclined Panel Caving method is performed in order to enlarge production pillars and therefore to improve stability in deep-level and good rock deposits. It will be only considered key aspects of the design to subsequently make a comparative economic and stability analysis.

The design considers caving using the Sublevel Caving method, lengthwise to the deposit and executing continuous extraction behind the cave front by draw points which are perpendicular oriented to Sublevel Caving galleries. These draw points are connected on each level of extraction to production galleries, parallel to the Sublevel Caving ones. The galleries used are 5 x 4.5m (w x h) and allow the transit of 15.2 yd³ LHD equipment since, due to the features of the method, has no length restrictions for loading.

In this design there are mainly two parameters that influence stability and design costs. First, the vertical distance between levels affects the overall inclination angle of the system as well as the caving drillings. For this reason, it is determined 20m of distance in order to achieve an overall angle of 49° and a maximum perforation length of 37m. The second key parameter is the length of the leading draw point; the increase of distance in this gallery increases the pillar length, giving this way a better resistance and also increasing mining infrastructure and travel distance of LHD equipment, enlarging investment and operation costs. Accordingly, it is decided to establish a 30m draw point length to balance the aforementioned effects.

The economic analysis shows that the inclined system is 366 [US\$/m²] more expensive in its investment cost than the Conventional Panel Caving. The operation cost for both systems is practically the same because, even though the equipment travels a longer distance with the inclined method, the fact of being bigger in size makes the returns assimilate and so their costs.

The comparative analysis of stability must be done in three dimensions to prove the singularities of the method, also the analysis shows that the Conventional Panel Caving possesses better stability indicators in caving galleries, draw points and production pillars. The main reason relies on the fact that mining infrastructure in Inclined Panel Caving is exposed to intermediate principal stress.

*“¿Mi mayor error? Pienso
que aún no lo he cometido”*

A. Senna

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores de mi comisión quienes me ayudaron mucho a lo largo de este trabajo desde sus conocimientos y visiones particulares de la minería, en especial al Profesor Arancibia quien me dio la oportunidad de trabajar con él en este tema y en los diferentes cursos de la universidad.

Quiero agradecer también a mi familia por el apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, sin ellos hubiese sido imposible transitar el camino universitario. Debo hacer una mención especial para mi mamá quien jugó un rol clave en mi crecimiento y la dedicación en los estudios y a mi papá que si bien no estuvo presente en mi etapa universitaria, me enseñó valores que definen a la persona que soy hoy.

Agradecer a todos los que me acompañaron en mi paso por Beauchef logrando una estadía agradable a pesar de la carga de estudio. A los que conocí en plan común y luego a los mineros con los que incluso formamos equipos de futbol y carrete teniendo diferentes resultados en ambos aspectos.

Mis amigos del colegio como Isra, Jose, Diego y Pipin con quienes sigo compartiendo también fueron un apoyo crucial en largas conversaciones y anécdotas. Agradezco pertenecer a nobles grupos como Los Cabros, Porteña sin Dientes, Amiguitos y BullaOriente quienes han sido fuente de entretenimiento y salidas extraordinarias.

En los dos párrafos anteriores entra el Pipo quien se merece un párrafo aparte por su gigante ayuda en este documento, gracias por darte el trabajo de leer esta memoria, por acompañarme en el colegio, en la U, por entretenerme y aconsejarme en todas esas ocasiones que he necesitado de tu ayuda.

Finalmente agradezco a la GTI por haberme apoyado y brindado las herramientas necesarias para realizar este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcances.....	3
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1. Eggbox Layout	4
2.2. Macrozanjas.....	5
2.3. Bateas Continuas	7
2.4. La Encantada.....	8
2.5. Finsch Diamond Mine.....	8
2.6. Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	9
3. METODOLOGÍA	10
4. DISEÑO SISTEMA INCLINADO	11
4.1. Alternativas evaluadas de Diseño Inclinado.....	11
4.1.1. Descripción de los distintos Sistemas Inclinales.....	11
4.1.2. Elección del Sistema Global de Explotación.....	16
4.2. Definición de la malla	17
4.2.1. Características de cada malla.....	18
4.2.2. Estabilidad de los pilares	18
4.2.3. Luz Crítica.....	19
4.2.4. Elección de la malla de extracción.....	21
4.3. Dimensionamiento de galerías	21
4.4. Distancia vertical entre niveles	23
4.5. Otros parámetros	24
4.5.1. Altura de socavación	24
4.5.2. Avance entre niveles de hundimiento	25
4.6. Largo galería zanja.....	25
4.6.1. Impacto en la estabilidad del pilar.....	25
4.6.2. Impacto en la inversión.....	26
4.6.3. Impacto en el costo operacional	27

4.6.4. Elección del largo de zanja	29
4.7. Conclusiones del diseño	29
5. COMPARACIÓN ECONÓMICA.....	30
Análisis de inversión.....	30
5.1.....	30
5.2. Costo operacional	33
5.3. Conclusiones económicas.....	34
6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	35
6.1. Análisis 2D	35
6.2. Análisis 3D	40
6.2.1. Modelo Panel Caving Convencional	40
6.2.2. Modelo Panel Caving Inclinado	43
6.2.3. Resultados galería de producción	45
6.2.4. Resultados galería hundimiento	47
6.2.5. Resultados estocadas	48
6.2.6. Resultados estabilidad pilar	50
6.3. Conclusiones de estabilidad.....	51
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
8. BIBILOGRAFÍA.....	56
9. ANEXO A – LÍNEA BASE DE COMPARACIÓN	58
10. ANEXO B – EQUIPOS UTILIZADOS.....	62
10.1. LHD.....	62
10.2. Simba.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros geomecánicos de la roca intacta y macizo.....	3
Tabla 2 Comparación de los tipos de Panel Caving Inclinado.....	16
Tabla 3 Comparación estabilidad del pilar.....	19
Tabla 4 Comparación span y De	19
Tabla 5 Características de las perforadoras radiales	22
Tabla 6 Presupuesto Desarrollos DET	31
Tabla 7 Total de Construcciones Horizontales	31
Tabla 8 Características de los disparos de socavación.....	32
Tabla 9 Costos de inversión analizados	32
Tabla 10 Modificación de parámetros	40
Tabla 11 Dimensiones del diseño PCC	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ciclo de vida métodos de explotación mina El Teniente. Extraído de (Cavieres, 1999).....	1
Ilustración 2 Diagrama general Eggbox. Extraído de (Laubscher, 2003)	4
Ilustración 3 Especificaciones entregadas por Laubscher. Extraído de (Laubscher, 2003)	5
Ilustración 4 Diagrama general del sistema macrozanjas. Modificado de (Cavieres, 1999)	5
Ilustración 5 Esquema 3D del sistema Macrozanjas. Extraído de (Diaz & Tobar, 2000)..	6
Ilustración 6 Vista planta del sistema macrozanjas. Extraído de (Diaz & Tobar, 2000)....	6
Ilustración 7 Bateas continuas, perfil transversal	7
Ilustración 8 Bateas continuas, perfil longitudinal	7
Ilustración 9 Diseño propuesto La Encantada. Extraído de (Valencia , Paredes, & Macías, 2014).....	8
Ilustración 10 Etapas del Diseño de Finsch Mine. Modificado de (Paucar & Mthombeni, 2004)	8
Ilustración 11 Secuencia de hundimiento Finsch. Extraído de (Paucar & Mthombeni, 2004)	9
Ilustración 12 Metodología	10
Ilustración 13 Vista isométrica y planta Eggbox. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)	11
Ilustración 14 Perfil transversal Eggbox. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)	12
Ilustración 15 Vista isométrica SLC truncado, en línea y alternado. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)	12
Ilustración 16 Vista perfil transversal SLC truncado	13
Ilustración 17 Vista isométrica SLC truncado	13
Ilustración 18 Vista isométrica SLC paralelo	14
Ilustración 19 Perfil transversal SLC paralelo	15
Ilustración 20 Perfil longitudinal SLC paralelo	15
Ilustración 21 Distintos tipos de malla evaluados	17
Ilustración 22 SRF según condición de esfuerzos.....	20
Ilustración 23 Efecto del span en la estabilidad.....	20

Ilustración 24 Dimensiones de Galerías	22
Ilustración 25 Altura mínima entre niveles.....	23
Ilustración 26 Altura máxima entre niveles	23
Ilustración 27 Altura de socavación	24
Ilustración 28 Avance entre niveles de hundimiento	25
Ilustración 29 Estabilidad según largo pilar	26
Ilustración 30 Costo desarrollo según largo pilar.....	27
Ilustración 31 Costo operacional según largo pilar	28
Ilustración 32 Valor actualizado del ahorro operacional	33
Ilustración 33 Modelos 2D construidos.....	35
Ilustración 34 Esfuerzo principal mayor para sistema horizontal	36
Ilustración 35 Esfuerzo principal menor para sistema horizontal.....	36
Ilustración 36 Esfuerzo deviatórico para sistema horizontal.....	37
Ilustración 37 Esfuerzo principal mayor en sistema inclinado	37
Ilustración 38 Esfuerzo principal menor en sistema inclinado	38
Ilustración 39 Esfuerzo deviatórico en sistema inclinado	38
Ilustración 40 Esfuerzo deviatórico para cada sistema según posición.....	39
Ilustración 41 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Convencional con cavidad superior	41
Ilustración 42 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Convencional.....	41
Ilustración 43 Vista en planta del factor de seguridad para la cota 1 metro sobre el nivel de producción del modelo Panel Caving Convencional.....	42
Ilustración 44 Vista longitudinal del factor de seguridad para corte longitudinal en centro de galerías del modelo Panel Caving Convencional	42
Ilustración 45 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Inclinado con cavidad superior	43
Ilustración 46 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Inclinado	43
Ilustración 47 Vista en planta del factor de seguridad para cota -85.6 metros (nivel intermedio) del modelo Panel Caving Inclinado	44
Ilustración 48 Vista longitudinal del factor de seguridad para corte longitudinal en centro de galerías del modelo Panel Caving Inclinado.....	45

Ilustración 49 Zona de control galería de producción del modelo Panel Caving Convencional.....	45
Ilustración 50 Zona de control galería de producción del modelo Panel Caving Inclinado	46
Ilustración 51 Evolución del factor de seguridad en la galería de producción con respecto a la distancia al frente de socavación	46
Ilustración 52 Zona de control galería de hundimiento del modelo Panel Caving Convencional.....	47
Ilustración 53 Zona de control galería de hundimiento del modelo Panel Caving Inclinado	47
Ilustración 54 Evolución del factor de seguridad en la galería de hundimiento con respecto a la distancia al frente de socavación	48
Ilustración 55 Zona de control estocadas del modelo Panel Caving Convencional.....	48
Ilustración 56 Zona de control estocadas del modelo Panel Caving Inclinado	49
Ilustración 57 Evolución del factor de seguridad en las estocadas con respecto a la distancia a bateas	49
Ilustración 58 Zonas de control utilizadas en pilares de producción del modelo Panel Caving Convencional.....	50
Ilustración 59 Zonas de control utilizadas en pilares de producción del modelo Panel Caving Inclinado.....	50
Ilustración 60 Factor de seguridad en la zona de control utilizada en pilares de producción.....	51
Ilustración 61 Vista isométrica diseño Panel Caving Convencional	58
Ilustración 62 Galerías zanja y calle del PCC.....	58
Ilustración 63 Dimensiones de la batea en planta	59
Ilustración 64 Dimensiones de la malla utilizada	59
Ilustración 65 Perfil longitudinal del diagrama de disparo de la batea.....	60
Ilustración 66 Perfil transversal del diagrama de disparo de la batea	60
Ilustración 67 Diagrama de disparo hundimiento PCC	61
Ilustración 68 Galería de hundimiento PCC	61
Ilustración 69 Dimensiones LHD utilizado	62
Ilustración 70 Radio de giro LHD.....	63

Ilustración 71 Dimensiones Simba	63
Ilustración 72 Posicionamiento Simba.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la naturaleza del negocio minero y la explotación de sus recursos es lógico pensar que en un principio las faenas extraen el mineral más cercano a superficie, siendo así los costos asociados a la extracción menores y por lo tanto el beneficio económico mayor. A medida que se profundiza la minería el objetivo es mantener la producción anterior haciendo necesaria la explotación al menor costo posible, lo cual lleva inevitablemente a la ejecución de minería por hundimiento.

Al analizar como la minería por hundimiento ha tendido a profundizar sus operaciones a lo largo del tiempo, rápidamente se puede concluir que la realización de nuevos diseños en base a conceptos generados años atrás puede conllevar a errores que afecten el negocio minero. Por esto es necesario el estudio de nuevos diseños para proyectos a mayores profundidades y con condiciones de esfuerzos más desfavorables a los que se evalúan actualmente.

Este cambio en los sistemas de explotación mineros ligados a la profundización de la de las operaciones queda reflejado en la evolución de los métodos de hundimiento usados en El Teniente a lo largo de su explotación. Esta información se puede apreciar en la siguiente imagen según el uso relativo de estos sistemas (Cavieres, 1999).

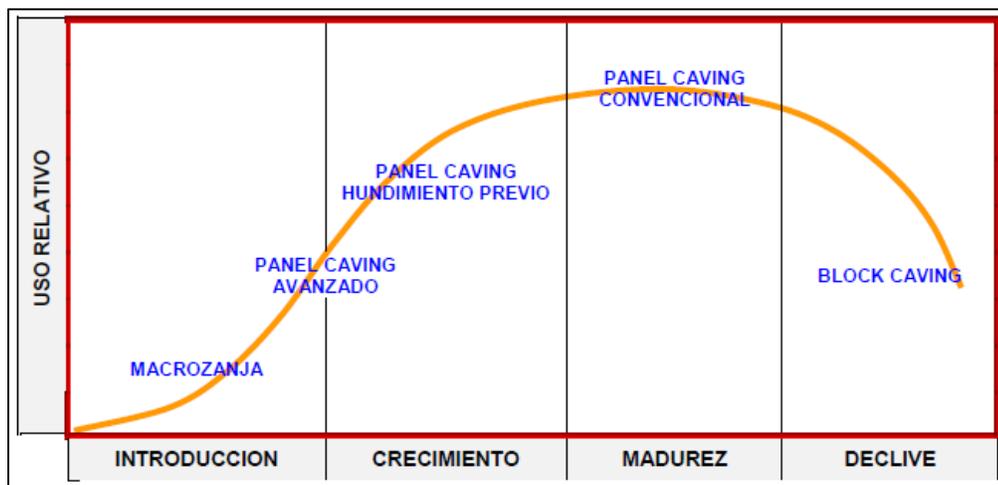


Ilustración 1 Ciclo de vida métodos de explotación mina El Teniente. Extraído de (Cavieres, 1999)

Además en la Ilustración 1 se puede apreciar que el método de macrozanjas se está empezando a estudiar en este yacimiento para evaluar su incorporación en las futuras etapas del proyecto, esto refleja que existe una tendencia en la industria a evaluar sistemas de producción inclinados cuando las condiciones de esfuerzos son muy altas

debido a las mayores profundidades, sin embargo, estos nuevos diseños se encuentran en estudio y su ejecución aún no es aceptada por gran parte de la industria.

1.1. Motivación

La profundización de la minas de Block o Panel Caving nos obliga a trabajar en ambientes de mayores esfuerzos, por lo tanto, se requiere revisar las configuraciones de diseño actualmente utilizadas en búsqueda de variantes que permitan aumentar la estabilidad de los desarrollos mineros y con ello aumentar la seguridad de las personas o equipos que por ahí transiten.

La inclinación del nivel de producción permite distanciar los desarrollos mineros sin afectar los flujos de material asociados a un proceso de caving, este espaciamiento permite aumentar el tamaño del pilar de producción en busca de mejores índices de estabilidad.

1.2. Objetivos

Para poder analizar esta sección de una mejor manera, se dividirán los objetivos generales de los específicos.

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es diseñar un método de Panel Caving inclinado tomando en consideración variables de estabilidad.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo se detallan en la siguiente lista:

- Diseñar las principales infraestructuras mineras que permitan la iniciación y producción de un Panel Caving inclinado.
- Estudiar la modificación de la etapa de hundimiento, realizando la socavación de forma diferente a la comúnmente utilizada en un Panel Caving Convencional.

- Realizar una comparación económica de la variante minera Panel Caving Inclinado versus un Panel Caving Convencional.
- Comparar mediante un análisis de estabilidad, el sistema horizontal de explotación versus el inclinado.

1.3. Alcances

La siguiente lista muestra los alcances de este trabajo:

- El estudio incluirá solo aspectos claves del diseño.
- Se considera mineral primario a 1000 metros de profundidad con 700 metros de cavidad explotada anteriormente.
- El régimen de esfuerzos in-situ está dado por un k_{NS} igual a 2 y un k_{EO} igual a 1.3
- Se considera un bloque de 300 x 200 metros de dimensiones basales, con una altura media de columna de 300 metros.
- La malla de extracción será de 17 x 22 metros.
- El estudio no considera la ventilación del sistema.
- Se considera un comportamiento lineal elástico del macizo rocoso para los análisis de estabilidad.
- El estudio contempla hundimiento en la variante convencional.

La calidad de la roca es buena y está caracterizada por los siguientes parámetros:

Tabla 1 Parámetros geomecánicos de la roca intacta y macizo

Parámetro	Valor
Densidad [t/m³]	2.78
UCS [MPa]	140
Q´	212
Módulo de Elasticidad del macizo [GPa]	44.9
Coefficiente de Poisson del macizo	0.21

2. ANTECEDENTES

A pesar de que el hundimiento inclinado no sea utilizado en la actualidad varios autores han propuesto diseños asociados a este tipo de hundimiento. A continuación se estudian ventajas y desventajas de estas propuestas.

2.1. Eggbox Layout

Se propone un sistema (Laubscher, 2003) el cual consiste en una caja inclinada que utiliza piques de traspaso hacia el nivel inferior para el manejo de materiales. La iniciación del Caving en este diseño se realiza con niveles de hundimiento que generan el corte basal necesario, esto significa una mayor cantidad de desarrollos y así un retraso en el inicio de la producción.

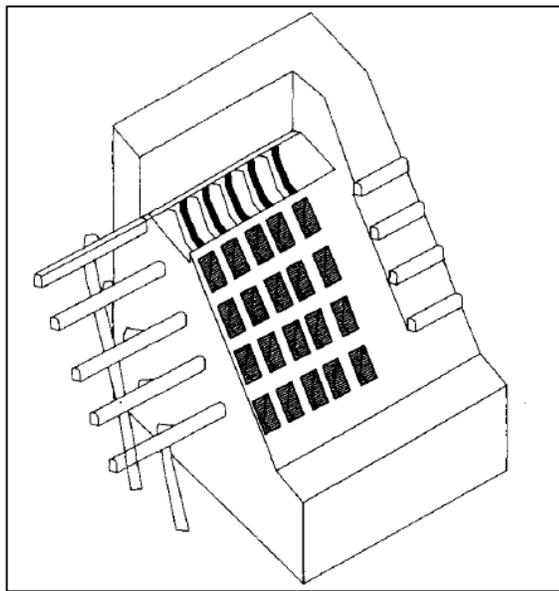


Ilustración 2 Diagrama general Eggbox. Extraído de (Laubscher, 2003)

El autor propone ciertas especificaciones al diseño que entregan algunos detalles del método, sin embargo, estas dimensiones no son dependientes de las características específicas del yacimiento en cuestión (tipo de roca, discontinuidades, etc.). Las determinaciones entregadas que mantienen fijo el ángulo de inclinación del sistema, se muestran a continuación en la Ilustración 3.

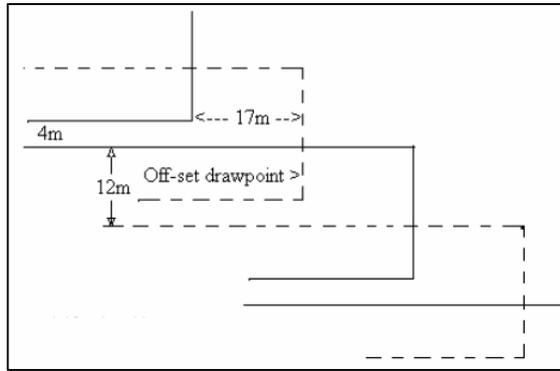


Ilustración 3 Especificaciones entregadas por Laubscher. Extraído de (Laubscher, 2003)

Cabe destacar que Laubscher propone este tipo de diseño en busca de adaptarse a la posible inclinación de un yacimiento masivo, la posible mejora de estabilidad no se encuentra dentro de sus objetivos principales.

2.2. Macrozanjas

Estudios asociados a El Teniente han propuesto un método de hundimiento inclinado llamado macrozanjas, la secuencia de construcción de este sistema comienza con un Sublevel Caving desde el centro de la macrozanja hacia sus extremos y una vez que se alcanza la geometría esperada se realiza el tiraje de los puntos de extracción definitivos. La forma de explotar el yacimiento en su etapa continua es similar a un Panel o Block Caving, lo anterior se puede apreciar en la Ilustración 4.

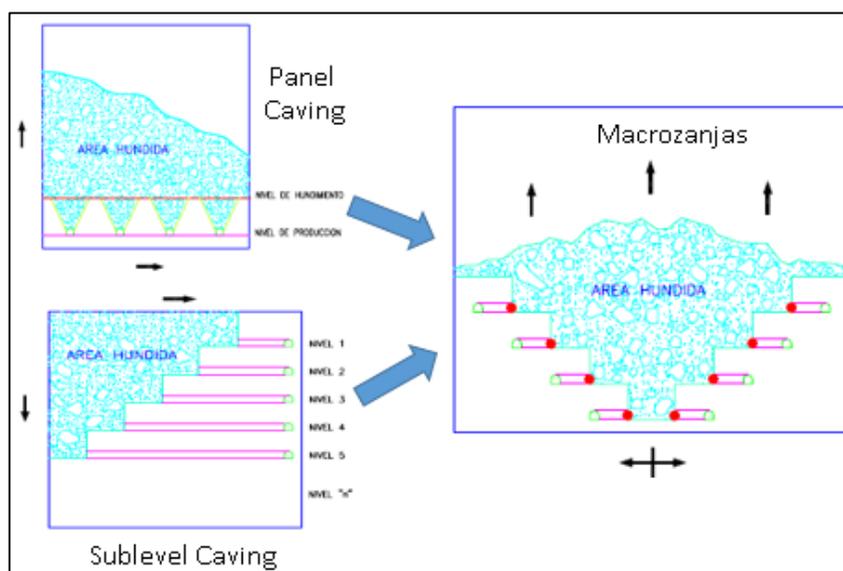


Ilustración 4 Diagrama general del sistema macrozanjas. Modificado de (Cavieles, 1999)

El método propuesto tiene una mayor estabilidad en general, pero en las partes superiores de este (Ilustración 5) donde se encuentran los taludes inversos, se presentan inconvenientes de estabilidad debido a la alta concentración de esfuerzos (Steffen, Robertson, & Kirsten, 1997). Debido al diseño de este método, la sección superior concentra esfuerzos y es justamente el lugar donde el ancho del pilar de producción depende de la malla de extracción, es por esta razón, que esa zona tiene una menor estabilidad.

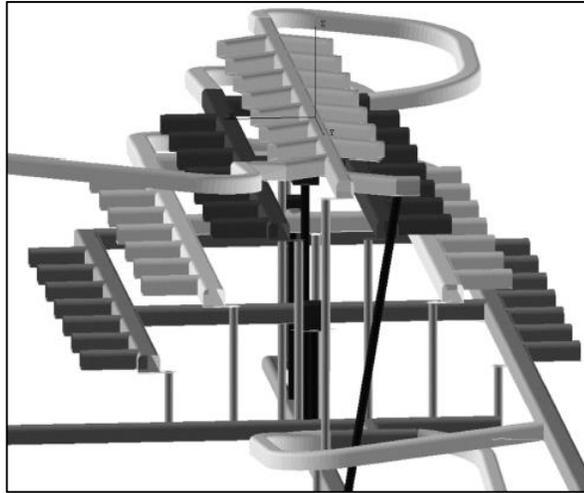


Ilustración 5 Esquema 3D del sistema Macrozanjas. Extraído de (Díaz & Tobar, 2000)

En la Ilustración 6 se puede apreciar la diferenciación de los niveles de extracción, el nivel superior es el único que tiene acceso por ambos lados a puntos de extracción y además se encuentran de manera oblicua. La oblicuidad de este nivel permite asegurar el largo de estocada mínimo para la correcta operación del equipo, pero afecta la estabilidad del pilar y agrega una orientación más de calles que puede perturbar la estabilidad local ante la presencia de discontinuidades.

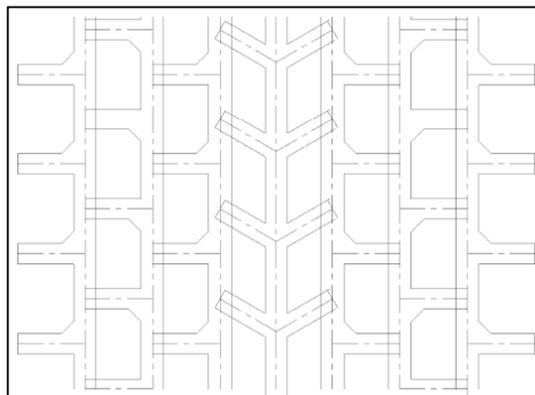


Ilustración 6 Vista planta del sistema macrozanjas. Extraído de (Díaz & Tobar, 2000)

2.3. Bateas Continuas

Para estudiar la posibilidad de modificar el hundimiento en los diferentes niveles de producción, existe una propuesta pensada para la iniciación de un caving horizontal (Walther, 1988) la cual consiste en crear una calle auxiliar de hundimiento por debajo de las bateas continuas (Ilustración 7) por donde se realizarán perforaciones radiales que conectarán con las bateas contiguas para así realizar el hundimiento.

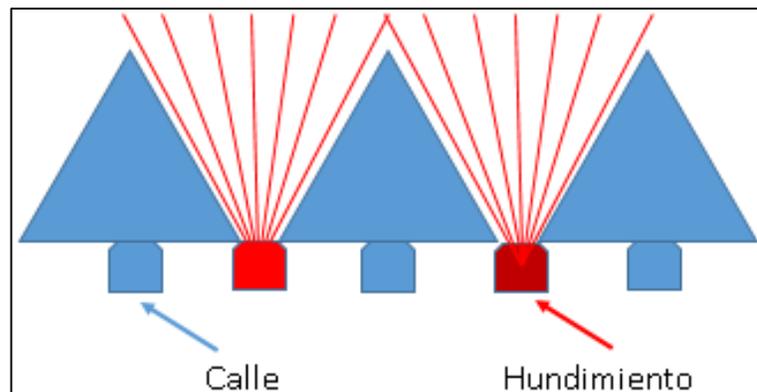


Ilustración 7 Bateas continuas, perfil transversal

Este sistema de iniciación no permite la creación de un pilar zanja, pues el diagrama de disparo se repite según el avance del hundimiento (Ilustración 8) creando así una batea continua de gran longitud.

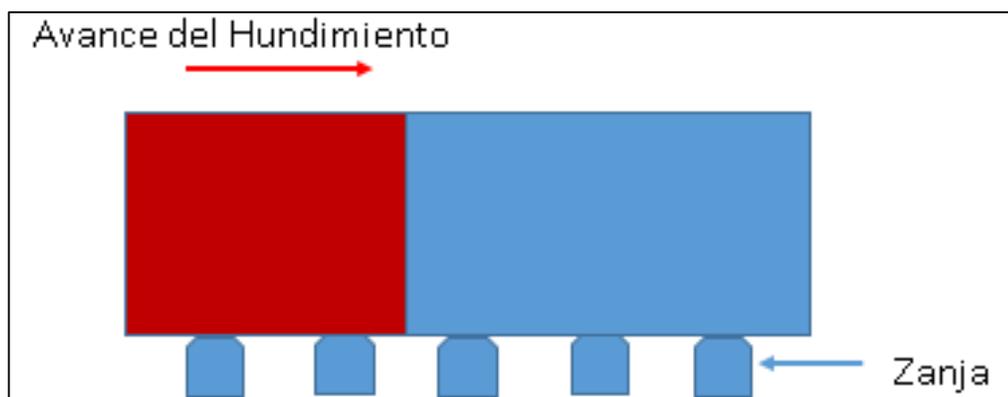


Ilustración 8 Bateas continuas, perfil longitudinal

2.4. La Encantada

Otro de los sistemas inclinados propuestos en los últimos tiempos es el caso de La Encantada Silver Mine la cual se encuentra en un yacimiento de minerales oxidados situado en México. Este yacimiento tiene una mala calidad de roca por lo que se buscan sistemas de explotación que aumenten la estabilidad (Valencia , Paredes, & Macías, 2014). Las condiciones de la mineralización permiten el uso de sistemas de manejo de material en base a scrappers y debido a las condiciones de estabilidad del macizo rocoso se genera el hundimiento desde los niveles de producción conectando las bateas y generando el caving con un bajo radio hidráulico.

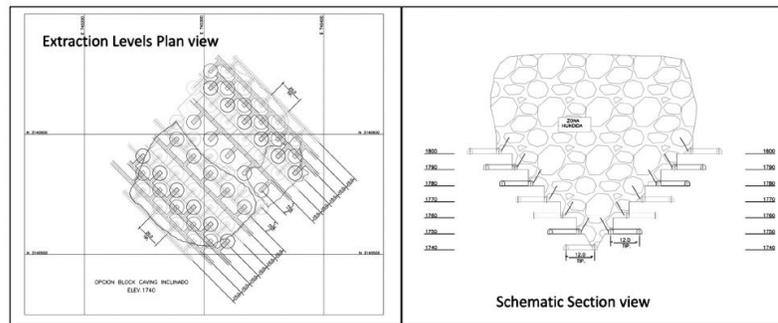


Ilustración 9 Diseño propuesto La Encantada. Extraído de (Valencia , Paredes, & Macías, 2014)

2.5. Finsch Diamond Mine

Finsch Mine es una faena ubicada en Sudáfrica la cual ha mutado a lo largo del tiempo en sus métodos de explotación utilizados, para futuras expansiones se ha estudiado la posibilidad de generar un sistema de caving inclinado para crear una mayor estabilidad global de los niveles de producción (Paucar & Mthombeni, 2004). La roca en donde se propone este diseño es de calidad baja, lo que permite el hundimiento al conectar las bateas y como el caving de las etapas anteriores de este proyecto se encuentra conectado se propone recuperar los pilares de los distintos niveles realizando un Sublevel Caving en retroceso.

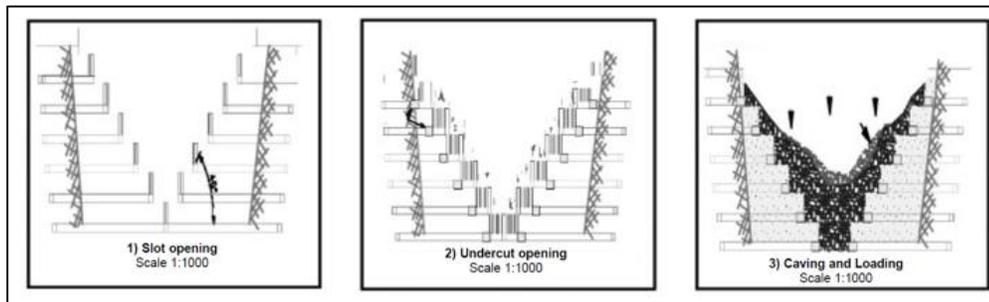


Ilustración 10 Etapas del Diseño de Finsch Mine. Modificado de (Paucar & Mthombeni, 2004)

El bajo radio hidráulico asociado a la calidad de la roca, permite comenzar el hundimiento de manera simple y gradual como se muestra en la siguiente ilustración:

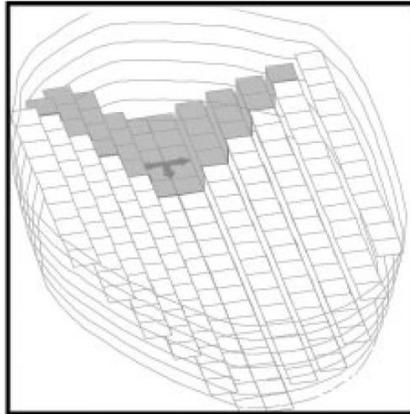


Ilustración 11 Secuencia de hundimiento Finsch. Extraído de (Paucar & Mthombeni, 2004)

2.6. Conclusiones de la revisión bibliográfica

Son diversos los autores que proponen sistemas inclinados de extracción por hundimiento, pero ninguna de estas publicaciones han sido llevadas a cabo para la explotación de un yacimiento, razón por la cual el diseño de un Panel Caving Inclinado es en base a estudios de otros autores, pero se realiza sin contar con experiencia operacional previa.

A excepción de las Macrozanjas, las publicaciones mencionadas anteriormente son propuestas de diseño sin entregar razones o antecedentes geomecánicos de las decisiones de diseño ni tampoco hay claridad sobre la orientación o magnitud de los esfuerzos, es por esto que la realización de un análisis exhaustivo de este tipo de sistemas abre paso a nuevos conocimientos sobre la utilidad y factibilidad de esta variante minera.

3. METODOLOGÍA

Para la realización del estudio se debe definir la metodología mediante la cual se obtienen tanto los resultados como las conclusiones. El procedimiento a seguir es presentado a continuación:

Definición del estado del arte: Como se estudia un tipo de extracción que no es utilizada en la gran minería, se deben estudiar las diferentes propuestas realizadas y las escasas experiencias obtenidas en pequeña y mediana minería.

Selección de parámetros de diseño: Una vez finalizada la etapa anterior y extraídas las principales conclusiones de cada experiencia o propuesta realizada para distintos yacimientos, es necesario proponer el diseño que será evaluado en la siguiente etapa. La definición de parámetros irá desde lo global a lo particular evaluando cualitativa o cuantitativamente, según corresponda, diferentes alternativas y estableciendo cuales son las variables críticas de diseño.

Análisis Comparativo: Para evaluar las posibles ventajas o desventajas se comparará el diseño propuesto con una línea base de comparación, definida en el ANEXO A, la cual fue seleccionada por ser la configuración más estable para condiciones similares (GMT, 2015). La comparación será en términos económicos y de estabilidad.

Lo anterior se puede resumir en la siguiente ilustración.

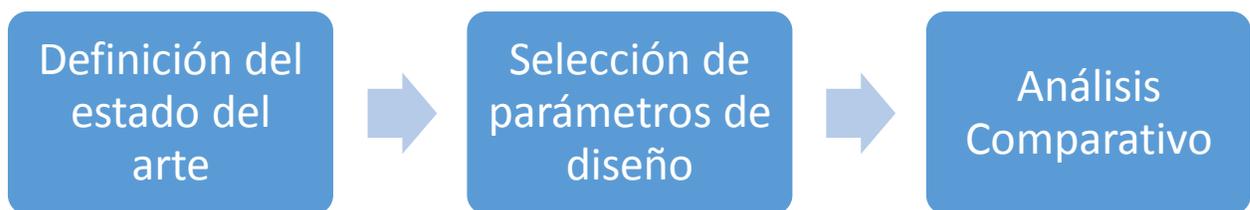


Ilustración 12 Metodología

4. DISEÑO SISTEMA INCLINADO

4.1. Alternativas evaluadas de Diseño Inclinado

Para realizar el análisis propuesto es necesario definir las características globales que debiese tener un sistema de caving inclinado. En las siguientes secciones se evaluarán las diferentes alternativas.

4.1.1. Descripción de los distintos Sistemas Inclinales

En primer lugar es necesario introducir los distintos sistemas inclinados que se pueden aplicar para una condición como la antes descrita. A continuación se expone una breve explicación de estos:

4.1.1.1. Egg Box

El diseño con forma de caja de huevo consta con niveles de hundimiento por sobre los puntos de extracción y bateas que conectan este nivel con el de producción. En la variante convencional de este método, una vez realizadas las bateas y el cruzado de producción, se inicia la socavación desde el nivel de hundimiento con una geometría similar a la presentada en la Ilustración 14.

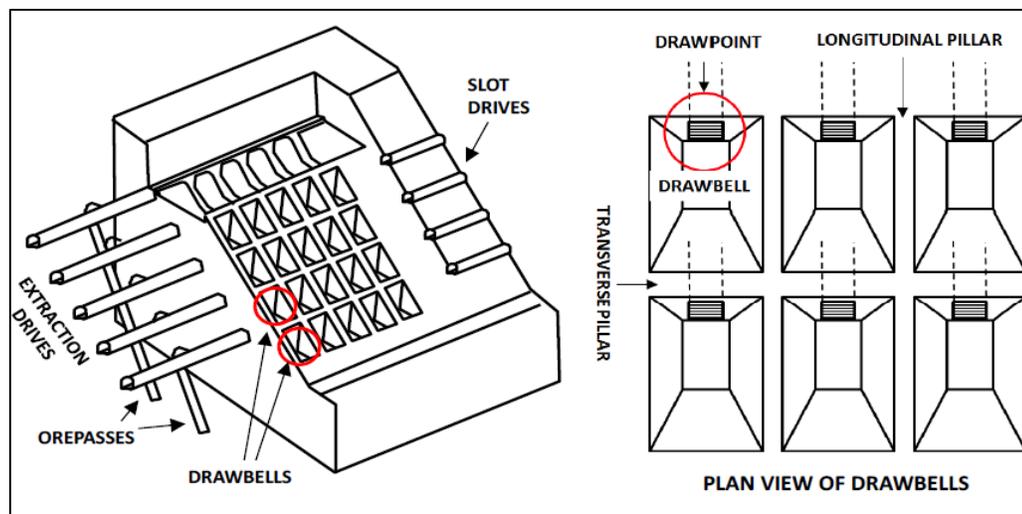


Ilustración 13 Vista isométrica y planta Eggbox. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)

La batea generada tiene una forma asimétrica y entre ellas se genera un pilar transversal, comparable con el pilar zanja de un sistema horizontal, el cual se puede apreciar en la Ilustración 13.

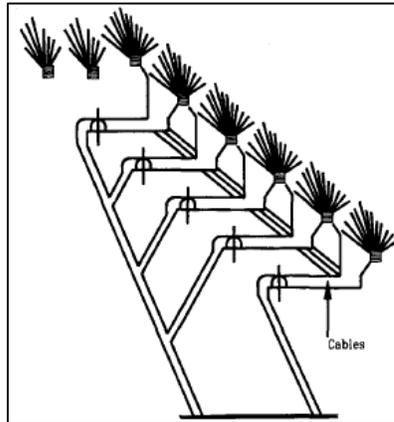


Ilustración 14 Perfil transversal Eggbox. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)

4.1.1.2. Sublevel Caving Truncado

Este sistema consta principalmente de dos etapas. En un comienzo se avanza de forma transversal desde un extremo del yacimiento utilizando el método de Sublevel Caving (SLC) hasta que el nivel superior llegue al otro extremo del bloque a explotar, una vez que esta posición se logra, se comienza a realizar el tiraje con puntos de extracción fijos. El método consta de dos variantes, con los puntos en línea o alternados (Ilustración 15), las cuales tienen prácticamente las mismas ventajas y desventajas globales siendo su única diferencia significativa el tipo de malla resultante (Jakubec & Laubscher, 2012).

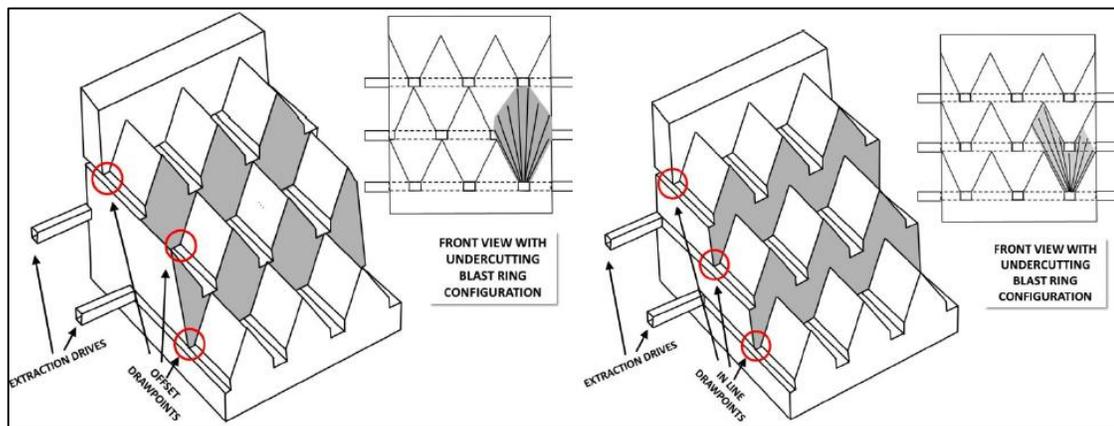


Ilustración 15 Vista isométrica SLC truncado, en línea y alternado. Extraído de (Jakubec & Laubscher, 2012)

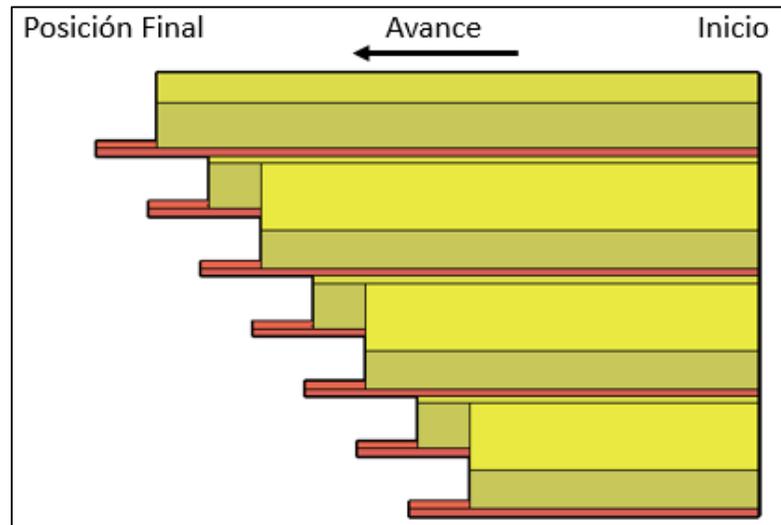


Ilustración 16 Vista perfil transversal SLC truncado

En la Ilustración 16 se puede apreciar una vista perfil de la etapa de SLC asociada a este método, cabe destacar que en la posición final se debe construir el nivel de producción con su respectiva fortificación definitiva pues estos puntos de extracción serán los que soporten la extracción mediante la propagación del caving. Además en la Ilustración 17 se aprecia la geometría del SLC que definirá posteriormente el espaciamiento entre los puntos de extracción. Debido a las recomendaciones del método SLC (Hustrulid & Kvapil, 2008) existirá traslape de los puntos pues la distancia horizontal de los niveles del SLC es menor al diámetro del elipsoide de extracción de un Panel Caving.

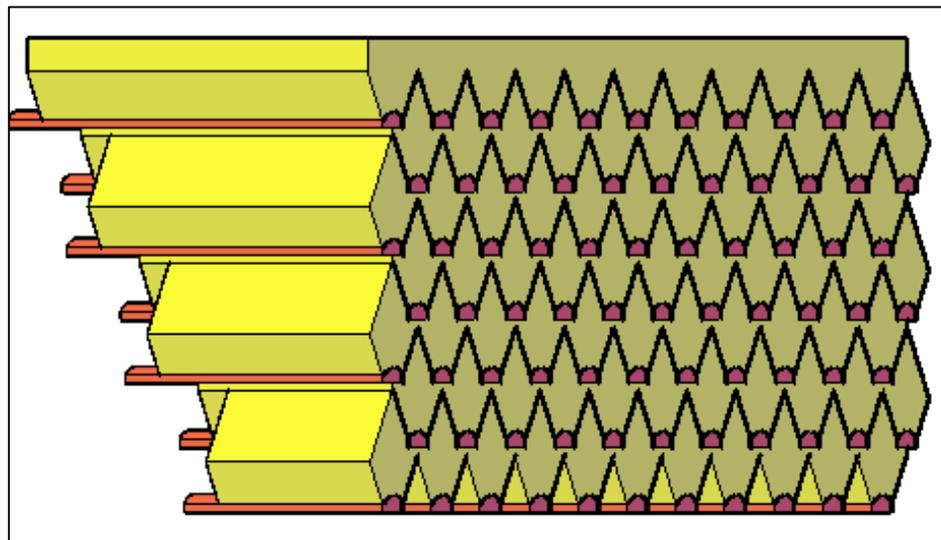


Ilustración 17 Vista isométrica SLC truncado

4.1.1.3. Hundimiento por Sublevel Caving en forma longitudinal

Este método considera la construcción de calles de hundimiento (color rojo) en el mismo nivel que las calles de producción y la socavación es realizada en retroceso con una orientación paralela a las calles de producción (color gris). Una vez que la socavación ha avanzado lo suficiente como para establecer una distancia de seguridad se inicia la socavación en el nivel inferior, repitiendo este procedimiento hasta alcanzar el ancho deseado. La geometría global del sistema se puede apreciar en la Ilustración 18

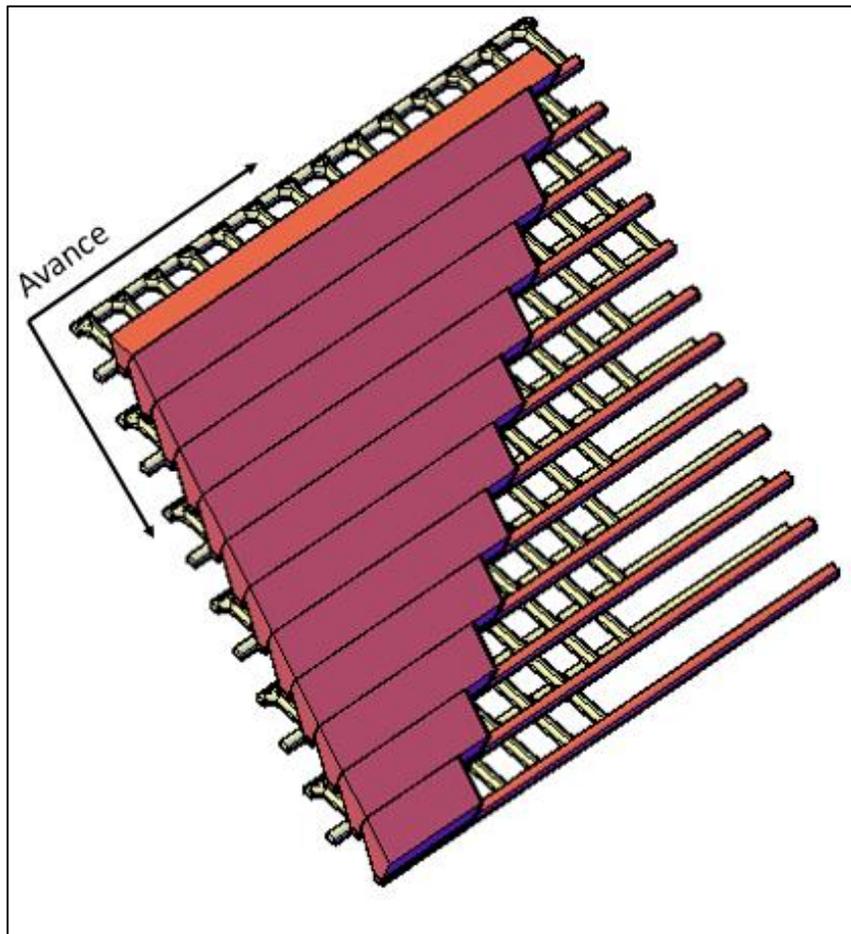


Ilustración 18 Vista isométrica SLC paralelo

La conexión entre niveles se realiza en la etapa de hundimiento considerando una geometría de la socavación que conecte con los niveles contiguos (Ilustración 19). Debido a esta necesidad de conexión el largo de perforación es alto y dependerá tanto de la altura de conexión elegida como de la distancia entre niveles deseada.

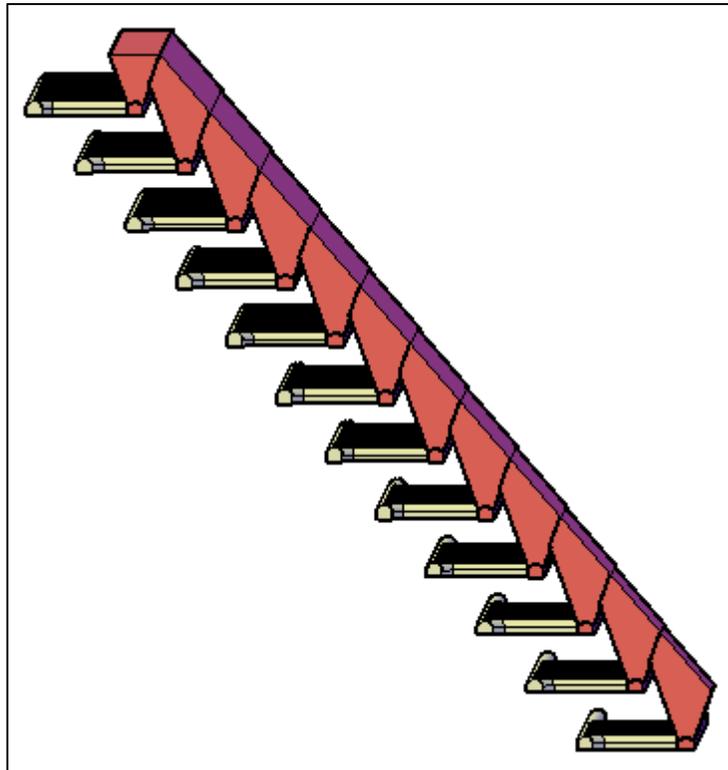


Ilustración 19 Perfil transversal SLC paralelo

Al igual que en un sistema de hundimiento horizontal convencional es necesario preparar con anticipación los puntos de extracción que serán incorporados, esto se puede apreciar en la Ilustración 20.

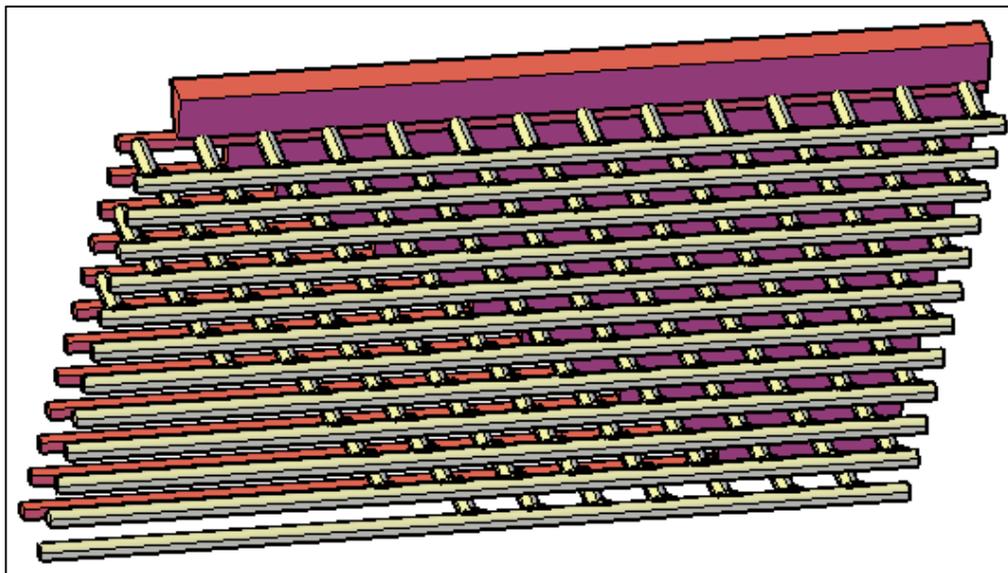


Ilustración 20 Perfil longitudinal SLC paralelo

4.1.2. Elección del Sistema Global de Explotación

En la Tabla 2 se presentan las principales ventajas y desventajas de cada método anteriormente explicado, mediante esta comparación se escogerá el método a realizar.

Tabla 2 Comparación de los tipos de Panel Caving Inclinado

Método	Ventajas	Desventajas
Egg Box	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de pilar transversal. • Menor Longitud de las perforaciones, pues la tronadura se realiza desde dos puntos. • Generación de malla uniforme sin traslape o separación de elipsoides. • Separación de niveles pudiese alejar esfuerzos del nivel de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de construcción debido a la poca continuidad del hundimiento. • Muy poca flexibilidad en la elección del espaciamiento de los cruzados. • Batea irregular cuyo ángulo de inclinación es muy pronunciado.
Sublevel Caving Truncado	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de pilar transversal. • Mayor producción en la etapa de preparación del caving. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran cantidad de mineral es extraído con un método de mayor costo. • Puntos excesivamente traslapados para respetar recomendaciones de Sublevel caving. • Mayor tiempo de preparación. • Gran cantidad de desarrollo involucrado.
Sublevel Caving Longitudinal	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor velocidad en la socavación. • Permite mayor flexibilidad en la elección de los cruzados. • Generación de malla uniforme sin traslape o separación de elipsoides. • Facilidad para crear circuitos de ventilación en etapa de preparación del hundimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor longitud de perforación para realizar la socavación. • Ausencia de pilar transversal.

Para realizar la elección es necesario analizar las reales consecuencias de ciertas características antes descritas. El largo de la perforación necesaria para llevar a cabo el hundimiento podría ser un problema operacional, pues si existiese un desvío significativo la conexión no estaría garantizada pudiendo existir pilares remanentes que

afecten la operación, sin embargo, en Kiruna Mine la tecnología Wassara logra perforaciones de 54 metros con desviaciones de 1-1.5 % (Quinteiro & Fjellborg, 2008), es por esto, que al introducir esta tecnología en la construcción del método esta desventaja debiese ser insignificante permitiendo un mayor largo de perforación.

Al elegirse una malla triangular, el pilar transversal estará sobre el cruzado de producción y se formará en el momento de incorporar el punto de extracción, por esta razón, este pilar no aportará estabilidad en la situación de altas cargas asociadas al abutment stress y su efecto será agregar altura de losa cuando el cruzado se encuentre bajo material quebrado.

Luego de que estas desventajas o ventajas según sea el caso se han relativizado, se puede apreciar claramente que el método que incorpora área mediante Sublevel Caving longitudinal posee grandes ventajas sobre el resto, así la elección del método a diseñar de manera más detallada es el anteriormente dicho.

4.2. Definición de la malla

Para definir la geometría del método de extracción se evaluarán diferentes mallas aplicables para un sistema inclinado, según el diseño antes seleccionado y la línea base definida el espaciamiento de los puntos en un mismo nivel es de 22 metros y se evalúan cuatro opciones para un largo de zanja de 20 metros considerando radios de curvatura de 4 metros para el giro del equipo y 1.5 metros para la constructibilidad del pilar. A continuación se muestran las distintas mallas evaluadas.

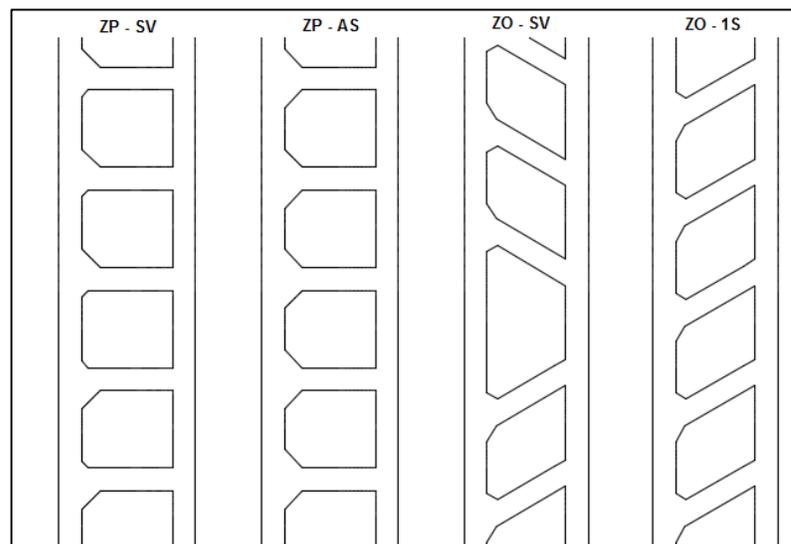


Ilustración 21 Distintos tipos de malla evaluados

4.2.1. Características de cada malla

Se entrega a continuación una breve descripción de las características de cada malla.

4.2.1.1. Zanjas Perpendiculares en Sentido Variable

Este diseño implica un ángulo calle-zanja de 90° y permite la coexistencia de dos o más LHD en el mismo nivel cuando existan descargas centrales (chancador o pique), sin embargo, a un punto de extracción solo se puede acceder desde un sentido de la calle.

4.2.1.2. Zanjas Perpendiculares en Ambos Sentidos

Este diseño implica un ángulo calle-zanja de 90° y permite la coexistencia de dos LHD en el mismo nivel cuando existan descargas centrales (chancador o pique), Además a un punto de extracción se puede acceder desde ambos sentidos de la calle.

4.2.1.3. Zanjas Oblicuas en Sentido Variable

Este diseño implica un ángulo calle-zanja de 60° y permite la coexistencia de dos o más LHD en el mismo nivel cuando existan descargas centrales (chancador o pique), sin embargo, a un punto de extracción solo se puede acceder desde un sentido de la calle. El gran inconveniente de este diseño es que tiene tres orientaciones de calles, por lo cual es muy difícil encontrar una orientación que permita sortear de mejor forma las posibles estructuras presentes en un yacimiento.

4.2.1.4. Zanjas Oblicuas en un Sentido

Este diseño, similar a la malla teniente, contempla un ángulo calle-zanja de 60° y su gran inconveniente es que no permite la operación de dos equipos de carguío al mismo tiempo sin construir lugares para maniobras de cambio de sentido del LHD.

4.2.2. Estabilidad de los pilares

Considerando un largo de zanja de 20 metros se evalúa la estabilidad del pilar formado entre cruzados que posee una altura de 5 metros, un UCS de 140 MPa y una condición de esfuerzo vertical de 75 MPa (esta condición de esfuerzos se asume para retratar el

comportamiento del pilar cuando se encuentra en abutment stress considerando un esfuerzo in-situ vertical de 30 MPa (Karzulovic, 2001)). Evaluando según la metodología de Lunder y Pakalnis, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3 Comparación estabilidad del pilar

Tipo de Malla	Zanja perpendicular en sentido variable	Zanja perpendicular en ambos sentidos	Zanjas oblicuas en sentido variable	Zanjas oblicuas en un sentido
Área pilar [m²]	330.9	324.0	275.8	275.8
Perímetro pilar [m]	70.8	69.3	69.2	69.2
Área influencia [m²]	550.0	550.0	491.1	491.1
Esfuerzo pilar [MPa]	124.7	127.3	133.5	133.5
Resistencia pilar [MPa]	107.9	107.9	103.1	103.1
Factor de seguridad	0.87	0.85	0.77	0.77

Como se puede apreciar en la tabla anterior, para el largo de zanja analizado todos los pilares son insuficientes para resistir esa condición de esfuerzos (asociada al sector de abutment), sin embargo, se puede observar que los cruzados de 90° podrían generar pilares más estables.

4.2.3. Luz Crítica

Otro aspecto a evaluar en la estabilidad de un diseño es el máximo span creado por las excavaciones necesarias. Considerando un ESR de 1.6 asociado a construcciones mineras permanentes fueron obtenidos los siguientes resultados.

Tabla 4 Comparación span y De

Tipo de Malla	Zanjas perpendiculares en sentido variable	Zanjas perpendiculares ambos sentidos	Zanjas oblicuas en sentido variable	Zanjas oblicuas un sentido
Span [m]	8.49	9.53	8.14	8.14
De [m]	5.31	5.96	5.09	5.09

Para realizar la comparación según los diferentes span utilizados en cada malla es necesario obtener del parámetro Q, el cual agrega condiciones de esfuerzos (SRF) y de agua (J_w) al ya conocido Q' (Tabla 1), con respecto a la condición de agua se puede suponer un estado seco o con infiltraciones menores ($J_w=1$). El factor de esfuerzos

varía según la magnitud de estos en el techo de la excavación, se puede suponer que la condición favorable es cuando la magnitud de estos es igual al esfuerzo vertical en abutment stress y la desfavorable es el máximo SRF permitido para realizar el cálculo del sistema de clasificación.

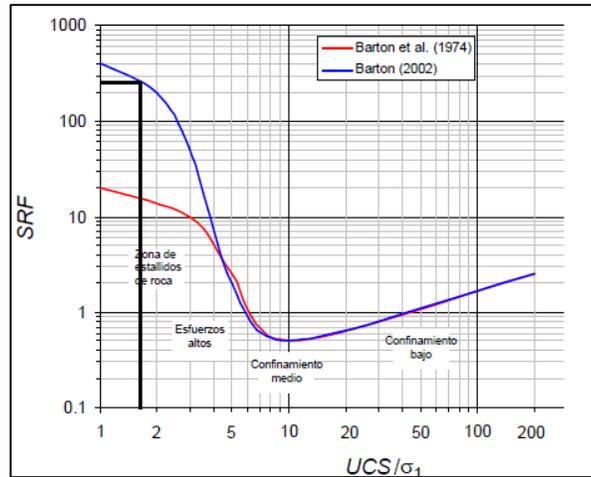


Ilustración 22 SRF según condición de esfuerzos

Con esta información se concluye que el valor de Q varía entre 0.53 y 0.85, con lo cual se pueden calcular los posibles efectos en la estabilidad de un mayor span. Para evaluar los impactos de estas diferencias se presenta la siguiente ilustración.

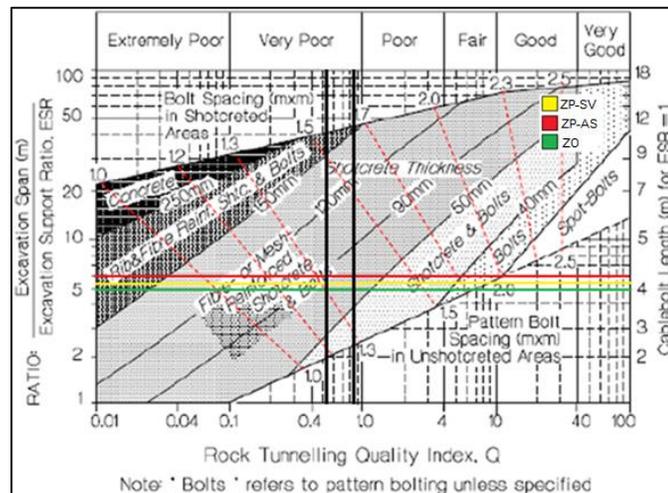


Ilustración 23 Efecto del span en la estabilidad

Como se puede apreciar en la Ilustración 23 el cuadrante en el cual se mueven los distintos tipos de mallas es lo suficientemente pequeño para suponer que el efecto de

las diferentes luces críticas no significan grandes ventajas o defectos en términos de estabilidad del sistema.

4.2.4. Elección de la malla de extracción

Según las características de cada malla mencionada anteriormente se realizará la elección del tipo de malla a utilizar en el modelo. La primera malla que se descarta es la que posee zanjas oblicuas en sentido variable (ZO-SV), pues sus variadas orientaciones generan una dificultad para adaptarse a distintos macizos rocosos debido a la posible existencia de discontinuidades. Considerando que este es un estudio simplificado, el concepto de adaptabilidad del diseño es clave pues permitirá el análisis con más detalle considerando variaciones según el macizo que se desee estudiar.

El diseño que considera zanjas oblicuas en un sentido (ZO-1S) tiene el mejor comportamiento en cuanto a luz crítica, sin embargo, esta característica es la que posee menores diferencias en los resultados entre los distintos tipos de mallas evaluadas. Este diseño es el único que no permite en un principio el tránsito de dos equipos de carguío en el mismo nivel y es el diseño con menor estabilidad en base al pilar según la Tabla 3, por estas razones se decide descartar este tipo de malla para futuros análisis.

Si se compara la malla que posee zanjas perpendiculares en sentido variable (ZP-SV) versus la que tiene zanjas perpendiculares en ambos sentidos (ZP-AS) se debe notar que la primera tiene mejor comportamiento en el análisis de estabilidad del pilar y la luz crítica, en cambio, la segunda posee mayor flexibilidad operacional en el momento de la operación. Como el diseño se efectúa pensando en una condición de esfuerzos muy alta, se decide elegir la opción que contempla zanjas perpendiculares en sentido variable (ZP-SV) pues la estabilidad será clave en el éxito o fracaso del diseño.

4.3. Dimensionamiento de galerías

Para elegir los perfiles de las galerías es necesario tener en cuenta los equipos que por ahí pudiesen transitar, considerando el método antes elegido se debe evaluar un equipo perforador radial de gran longitud de perforación y elevada precisión, para esto se evalúan los equipos de Atlas Copco (Atlas Copco, 2015) pues son usados en Kiruna Mine con gran precisión y longitud (Quinteiro & Fjellborg, 2008). La forma en que se realiza el hundimiento es muy similar a un Sublevel Caving y es por esto que se deben respetar las recomendaciones de diseño para este método (Hustrulid & Kvapil, 2008), fundamentalmente los 70° que debe tener el abanico de hundimiento.

Tabla 5 Características de las perforadoras radiales

Equipo	M4 C	M6 C	W6 C
Largo de perforación [m]	51	51	63
Diámetro de perforación [mm]	95-178	96-165	115-165
Radio de giro interno [m]	3.8	3.8	4.3
Radio de giro externo [m]	6.3	6.3	8.0
Ancho galería [m]	4.5	5.2	5.2
Alto galería [m]	4.5	5	5
Alto primera perforación [m]	3.5	4	4

Como se quiere reducir el ancho de la galería y aumentar el radio de curvatura del techo para así aumentar la estabilidad de la labor de hundimiento, se elige el equipo M4 C.

En las labores de producción el método permite elegir un equipo de gran tamaño pues el largo de este no es condicionante para la ubicación de los puntos de extracción. Así el modelo elegido es el CAT R300H en su variante de 15.2 yd³, balde que es el más grande del mercado según lo informado en las páginas web de los fabricantes CAT (CAT, 2015), Sandvik (Sandvik, 2015) y Atlas Copco (Atlas Copco, 2015). Según las recomendaciones del proveedor las dimensiones de las galerías de transporte y cruzados quedan determinadas de la siguiente manera.

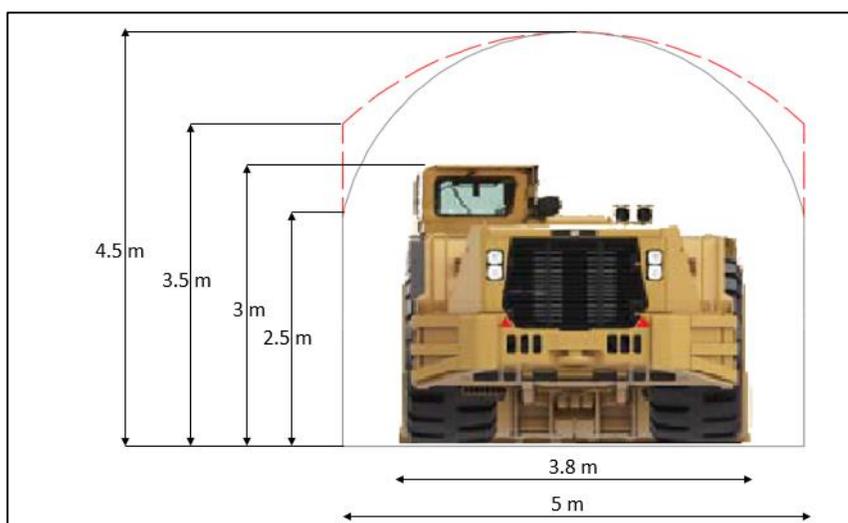


Ilustración 24 Dimensiones de Galerías

Como este equipo se ocupará para el retiro de mineral en la socavación, la galería de hundimiento antes seleccionada deberá expandirse hasta los 5 metros de ancho.

4.4. Distancia vertical entre niveles

Se debe definir la distancia vertical entre los niveles de producción del método y para esto se considera una malla triangular caracterizada por un elipsoide de 20 metros de diámetro, la distancia horizontal entre niveles para un elipsoide de esas características es de 17.32 metros para crear una malla con los elipsoides tangentes entre sí, luego considerando la recomendación de 70° para mejorar el flujo del material, las posibles distancias entre niveles varían desde los 5 hasta los 37 metros generando ángulos globales de 16° y 65° respectivamente. (Ilustración 25 e Ilustración 26)

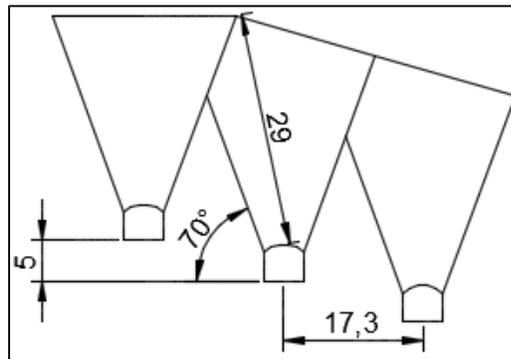


Ilustración 25 Altura mínima entre niveles

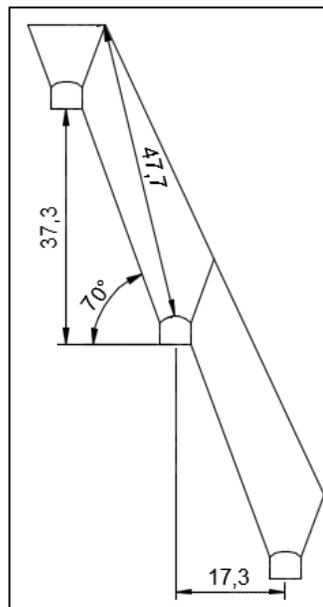


Ilustración 26 Altura máxima entre niveles

Se toma la decisión realizar un nivel cada 20 metros para así representar un valor medio de las posibilidades, generar una loza de separación robusta sin la necesidad de aumentar innecesariamente el ángulo global del diseño y establecer un punto de comparación con el diseño horizontal que tiene como tendencia esta distancia entre niveles de hundimiento y producción (Arce, 2002). Para esa separación entre niveles se genera un largo máximo de perforación de 37 metros y un ángulo global de 49°.

Para hacer frente a la mayor longitud de perforación y su posible desviación se considera el uso de perforación con un diámetro de 115 milímetros lo que entregaría una desviación menor a 0.5° (Quinteiro & Fjellborg, 2008).

4.5. Otros parámetros

Además se analizan otras variables de diseño que por su naturaleza no debiesen afectar de mayor manera la estabilidad o rentabilidad del método propuesto.

4.5.1. Altura de socavación

La altura de socavación es un parámetro que en teoría no debiese afectar el hundimiento pues este se genera por una componente de área abierta y no por un volumen de mineral tronado, sin embargo, la altura de socavación genera diferentes resultados en la constructibilidad y la operatividad del método. Para no interferir en criterios operacionales y no aumentar de manera excesiva el largo de los tiros de socavación, se decide realizar una altura de socavación de 10 metros pues es medianamente baja para la industria (Arce, 2002).

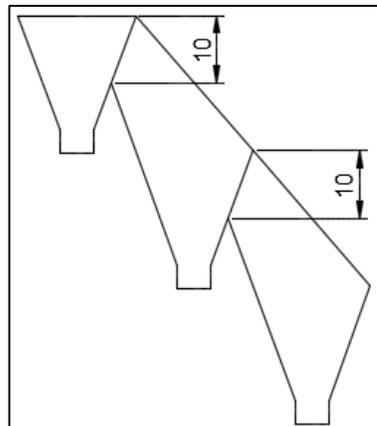


Ilustración 27 Altura de socavación

4.5.2. Avance entre niveles de hundimiento

Para definir el avance entre distintos niveles de hundimiento se deben estudiar criterios de diseño en minería realizada por Sublevel Caving, la selección de este parámetro influirá en cómo afecta el abutment stress al avance del hundimiento. Se tomó en consideración el caso de Big Bell Mine (Player, 2001) cuyas condiciones iniciales de esfuerzos tienen un nivel comparable al caso de estudio, en esta mina tomaron la decisión de mantener 30 metros de avance considerando distancia vertical entre niveles del mismo valor. Para mantener este ángulo del frente de socavación se eligen 20 metros de avance entre niveles.

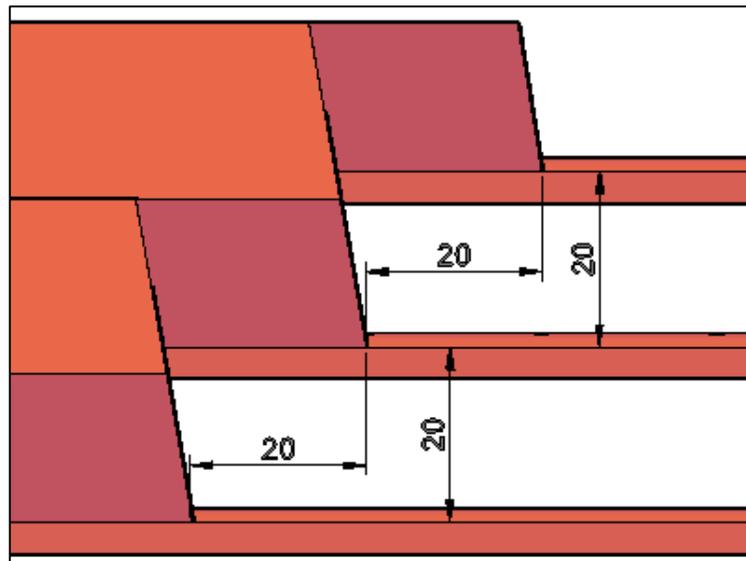


Ilustración 28 Avance entre niveles de hundimiento

4.6. Largo galería zanja

La motivación principal de este trabajo es estudiar la posibilidad de agrandar el pilar de producción para así aumentar la estabilidad del sistema, definir el tamaño de este pilar es una decisión técnico-económica y a continuación se estudian los posibles impactos de aumentar o disminuir el largo del pilar.

4.6.1. Impacto en la estabilidad del pilar

Para evaluar la estabilidad del pilar se considerará el método empírico de Lunder & Pakalnis tomando en consideración los parámetros de la roca expuestos en la Tabla 1. Al ser el esfuerzo in situ vertical igual a 30 MPa se deben suponer rangos de esfuerzo de 60 a 90 MPa en la zona de abutment (Karzulovic, 2001).

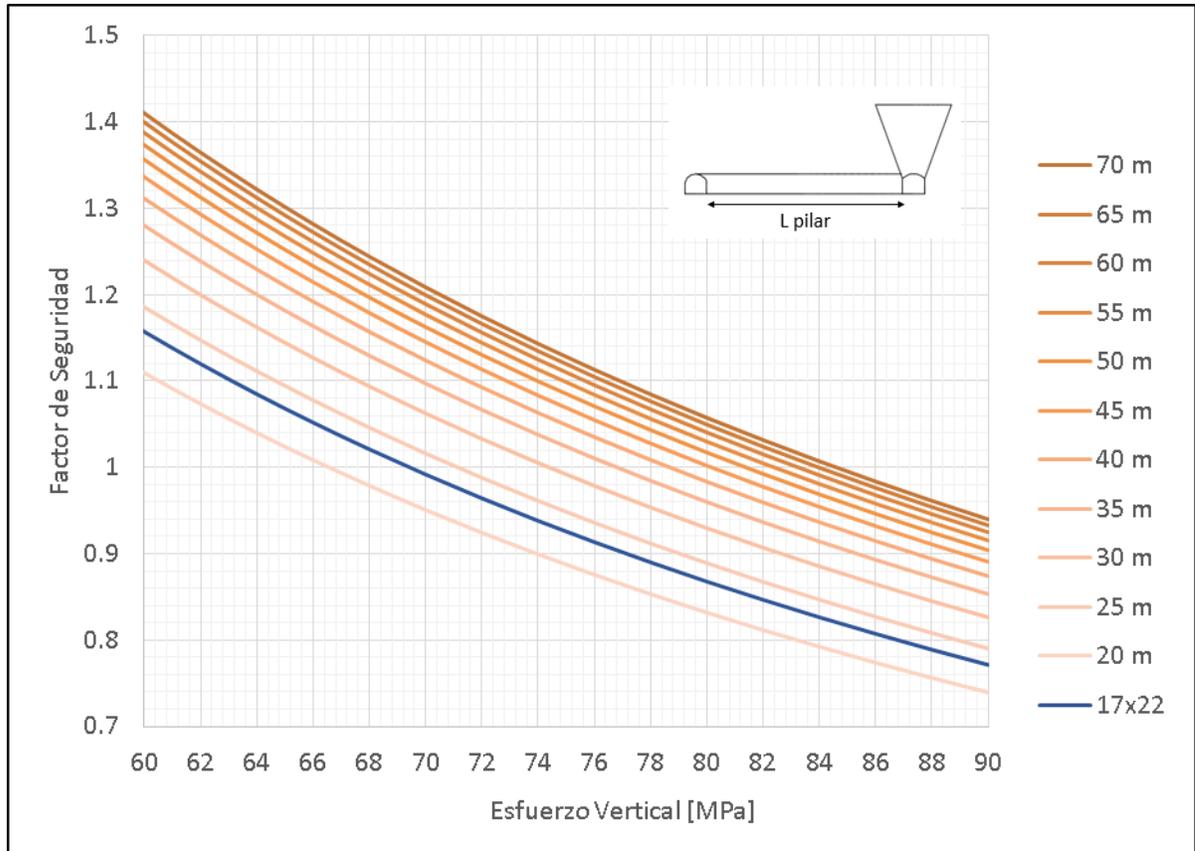


Ilustración 29 Estabilidad según largo pilar

Como se puede apreciar en la Ilustración 29 a medida que se aumenta el largo del pilar se puede apreciar una mejora en la estabilidad pero esta mejora es a tasas decrecientes, esta condición de tasa decreciente en la estabilidad se explica por la disminución en el aumento del ancho efectivo cuando el pilar crece solo en una dirección.

4.6.2. Impacto en la inversión

La inversión en el nivel de producción estará fuertemente condicionada por el largo de zanja que se utilice, claramente un mayor largo de zanja involucra mayor costo de desarrollo y este aumento se evalúa en la siguiente ilustración.

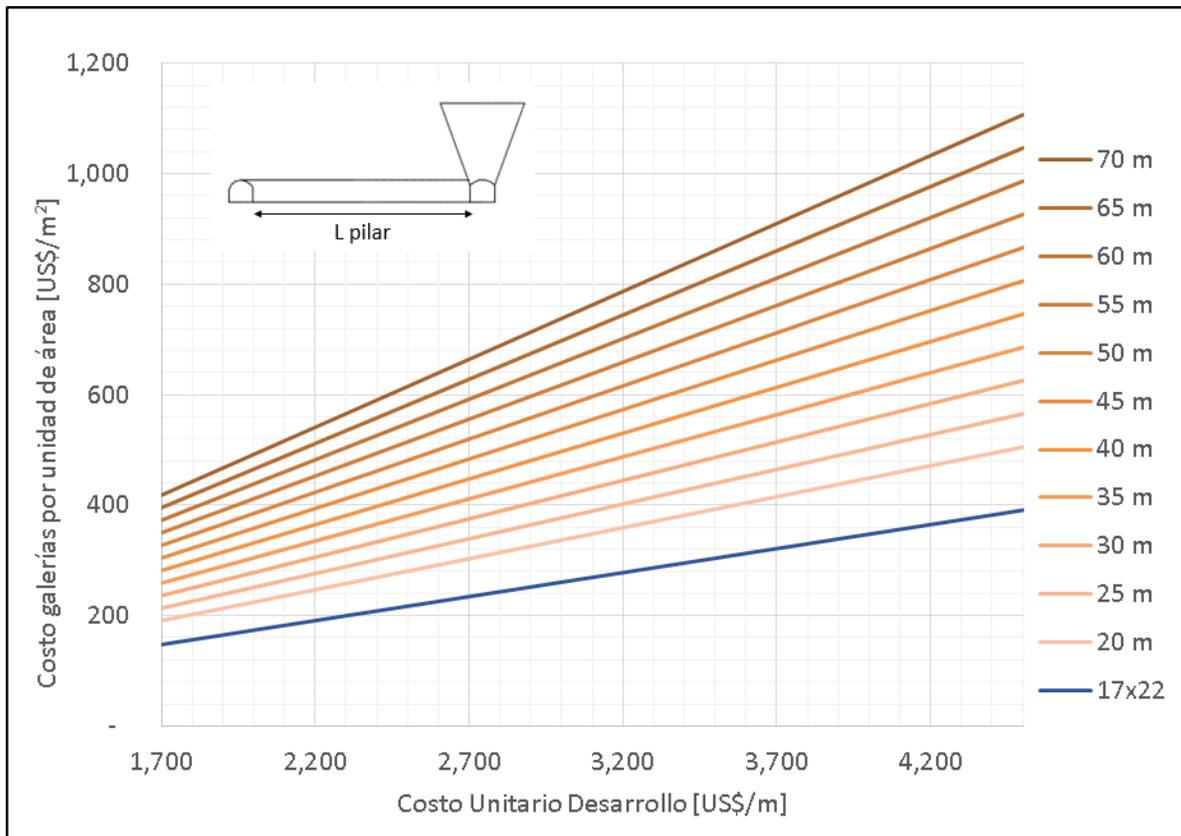


Ilustración 30 Costo desarrollo según largo pilar

El costo por unidad de área de la Ilustración 30 considera solo galerías del nivel de producción y hundimiento, para el sistema inclinado y horizontal, suponiendo diferentes costos unitarios de desarrollo. El análisis debe considerar además que en el caso de un sistema horizontal las galerías de hundimiento tienen un tamaño considerablemente menor que al resto de las galerías por lo cual el costo medio unitario de un Panel Caving horizontal es menor que el asociado a un Panel Caving inclinado.

En esta ocasión el impacto de alargar la galería zanja no tiene aumentos de costo a tasas decrecientes, razón por la cual, si las condiciones de esfuerzos son muy desfavorables el largo de zanja que asegure estabilidad probablemente será demasiado caro en términos de costo de desarrollo.

4.6.3. Impacto en el costo operacional

Al aumentar el largo de zanja claramente se aumenta la distancia de acarreo del LHD y por consiguiente el costo operacional, sin embargo, la posibilidad de tener zanjas de gran longitud permiten la operación de equipos de mayor tamaño debido a la ausencia

de la limitante del largo del equipo, este trade-off claramente dependerá de la separación de los puntos de vaciado pues si es lo suficientemente amplia, un mayor largo de zanja no afectará en gran medida la comparación de los tiempos de ciclo del sistema horizontal versus el inclinado.

Para realizar la comparación se obtuvieron costos y tiempos operacionales de División El Teniente para distintos tamaños de balde (SKM minmetal, 2007) los cuales se extrapolaron para ajustarlos al tamaño seleccionado anteriormente.

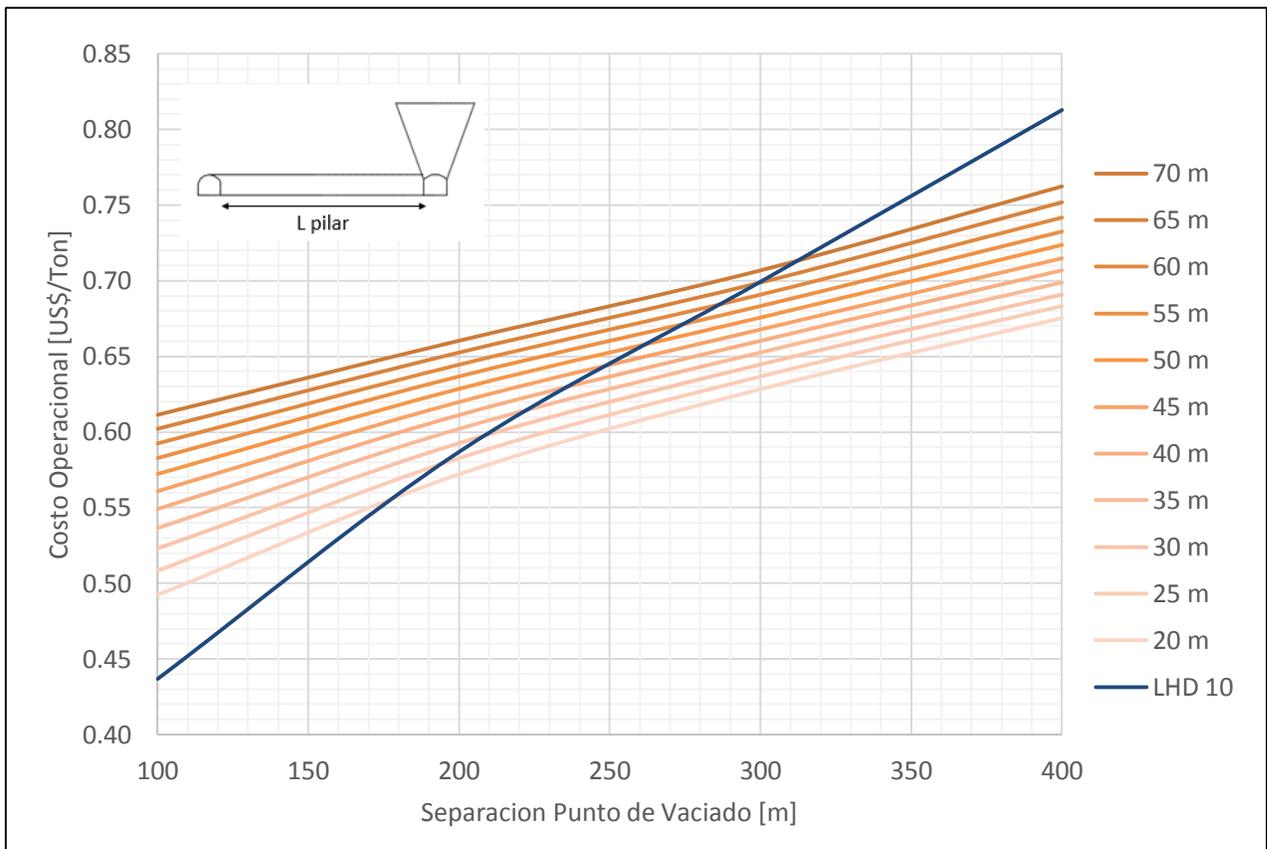


Ilustración 31 Costo operacional según largo pilar

Si se crean puntos de vaciado en los extremos del layout (300 metros de separación) el costo operacional del cargador frontal en el sistema inclinado es levemente menor al sistema horizontal (con su equipo de 10 yd³). A pesar que la distancia de traslado aumenta cuando se crea una estocada de mayor magnitud, este efecto negativo se ve compensado por el aumento de un 52% del tonelaje efectuado en cada viaje.

4.6.4. Elección del largo de zanja

Según los tres puntos anteriores se puede intuir que la selección debe ser un valor medio-bajo pues los costos aumentan linealmente, en cambio, la estabilidad lo hace de manera decreciente. Como el diseño del sistema busca establecer un aumento en la estabilidad se selecciona el largo de estocada que alcanza un factor de seguridad 1 y que coincide además con el momento en que el factor de seguridad deja de aumentar a una tasa mayor al 5%.

El largo que cumple lo descrito anteriormente es el largo de zanja de 30 metros, lo que significa un aumento de un 60% en construcción de galerías y una disminución del costo operacional de 0.06 [US\$/ton].

4.7. Conclusiones del diseño

El diseño escogido tiene la característica de mezclar dos métodos altamente productivos, como lo es un Sublevel Caving y un Panel Caving y al ser métodos de explotación altamente conocidos su mezcla no debiese generar grandes complicaciones en términos operativos. El hecho de generar la socavación con un Sublevel Caving permite suponer que existirá una simplificación en esta labor que permitirá disminuir los tiempos de conexión del caving, sin embargo, esta ventaja no será considerada dentro de los futuros análisis.

El método elegido es aplicable a distintas mallas de extracción y otorga la posibilidad de generar una malla homogénea sin castigar la operación de los equipos de carguío y transporte. La opción de elegir el equipo de mayor tamaño tiene como objetivo aprovechar el largo de la estocada que permite el carguío frontal, sin embargo, el aprovechamiento no es total pues actualmente existen en el mercado equipos de mayor capacidad de levante, utilizados en la minería de hierro, pero no consideran una mayor capacidad de balde que hubiese sido útil en este tipo de diseño.

Siguiendo las metodologías de diseño se fijan la mayoría de sus parámetros dejando libres la distancia vertical entre niveles y el largo de la estocada de carguío, estas dos dimensiones serán claves en términos de estabilidad, pues la primera modificará el ángulo global del sistema (modificando así la redistribución de los esfuerzos) y la segunda aumentará la estabilidad castigando los costos de inversión y operación del método.

5. COMPARACIÓN ECONÓMICA

La comparación económica se realizará en términos de las diferencias de inversión de ambos sistemas estudiados y según los diferentes costos operacionales en los que se tiene cierto nivel de detalle.

5.1. Análisis de inversión

Para realizar la comparación en términos de inversión entre los distintos sistemas se debe dejar en claro que aspectos de cada sistema se evaluarán. Las obras consideradas se detallan a continuación:

- Sistema Inclinado:
 - Construcción y Fortificación Galerías Hundimiento
 - Construcción y Fortificación Galerías Calle
 - Construcción y Fortificación Galerías Zanja
 - Perforación y Tronadura Hundimiento

- Sistema Horizontal:
 - Construcción y Fortificación Galerías Hundimiento
 - Construcción y Fortificación Galerías Calle
 - Construcción y Fortificación Galerías Zanja
 - Construcción Chimenea Piloto Bateas
 - Perforación y Tronadura Bateas
 - Perforación y Tronadura UCL

Como el análisis es solo comparativo se descarta incluir empalmes o fortificaciones de puntos pues no existen mayores diferencias entre ambos sistemas, además como la ventilación está fuera de los alcances de este trabajo se excluye del análisis económico.

Para realizar la comparación económica de ambos sistemas se tomarán como datos de entrada el presupuesto de desarrollos realizado el año 2015 por División El Teniente, las obras cotizadas se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 6 Presupuesto Desarrollos DET

Obra	Valor [US\$]
Desarrollo vertical D 1.5 m NP [m]	3,720
Desarrollo 4.0 x 4.0 P-M UCL [m]	2,580
Desarrollo de calles 5.0 x 4.3 PMS NP [m]	4,218
Desarrollo 5.2x4.32 accesos PMS NP [m]	4,355
Perforación radial 2 1/2" [m]	37
Perforación radial 4 1/2" [m]	67
Tronadura-Hundimiento [m²]	110

Considerando el tamaño de bloque de 300 x 200 metros se consideran 168 puntos de extracción lo que deriva en las siguientes construcciones horizontales:

Tabla 7 Total de Construcciones Horizontales

Tipo de Galería	Horizontal	Inclinado
Galería Hundimiento [m]	2,100	3,600
Galería Calle [m]	2,100	3,600
Galería Zanja [m]	3,149	5,040

Como el sistema inclinado tiene para cada calle cruzados por solo un lado de esta se necesitarán más calles para acceder al mismo número de puntos, además al ser la socavación desde el mismo punto de extracción y no al centro de dos bateas (como el caso del nivel horizontal) nuevamente se necesitarán un mayor número de galerías de hundimiento. La motivación de este trabajo es aumentar la estabilidad del pilar en base a un aumento de su largo, razón por la cual, es de esperar que la cantidad de galerías zanja sea mayor en el caso del sistema inclinado. El total de construcciones analizadas anteriormente se pueden apreciar en la Tabla 7.

Para concluir con los análisis económicos es necesario calcular los costos de socavación de cada uno de los sistemas, los cuales se verán fuertemente influenciados por el diseño de la tronadura del sistema. En la Tabla 8 se especifican los parámetros más importantes de los diseños de tronadura y se contabilizan los metros barrenados en el diseño.

Tabla 8 Características de los disparos de socavación

Característica del Disparo	Horizontal	Inclinado
Espaciamiento tiros [m]	3.4	3.7
Burden [m]	3.4	2.9
Total barrenado [m]	333,226	256,468

Como el sistema inclinado tiene un mayor diámetro de perforación, debido a su mayor largo de perforación, es normal que tenga menor cantidad de metros barrenados, lo que no significa que su costo de perforación sea menor. Para concluir el análisis económico solo es necesario agregar los costos de tronadura y chimeneas piloto de las bateas para que el resultado sea el siguiente:

Tabla 9 Costos de inversión analizados

Obra	Valor [US\$/m ²]	
	Horizontal	Inclinado
Galerías Zanjas	221.4	354.3
Galerías Calles	152.4	253.1
Galerías Hundimiento	90.3	253.1
Perforación Bateas	60.5	287.5
Perforación Hundimiento	147.1	
Voladura Bateas	47.4	125.1
Voladura Hundimiento	115.2	
Chimeneas	72.9	-
Total	907.1	1,273.0

Como se puede apreciar en la Tabla 9 el análisis de inversión entrega que el diseño inclinado presenta un 40% más de inversión que el horizontal para las obras analizadas en esta sección. La mayor diferencia se presenta en las galerías de hundimiento pues se necesitan aproximadamente el doble de estas para realizar la socavación y además son de mayor tamaño debido al tipo de equipos que realizan la perforación.

Es necesario recalcar que el análisis de inversión es para los detalles de diseño que están dentro del alcance y que poseen diferencias entre ambos niveles, por lo que una diferencia del 40% en el costo de inversión analizado no significa que la inversión del nivel de producción sea de un 40% mayor, ya que al sumar los otros costos equitativos

para ambos sistemas esta diferencia porcentual tenderá a disminuir, lo que sí se puede extraer como conclusión, es que el costo de inversión del nivel de producción inclinado es mayor en 366 dólares por cada metro cuadrado construido.

Como la ventilación se encuentra fuera de los alcances del estudio no se considera la comparación económica de esta, pero realizando un análisis simple se puede notar que si se crea un nivel inclinado de ventilación este poseerá mayor cantidad de construcciones para cubrir el mismo ancho de columna, además en el caso de un largo de zanja elevado se deberán realizar estudios sobre la ventilación en el punto de extracción.

5.2. Costo operacional

Al seleccionar un largo de zanja de 30 metros se genera una reducción del costo operacional en el LHD de 0.06 [US\$/ton] (4.6.4). Para evaluar el real impacto de este ahorro se debe actualizar la disminución de costos asociada a la producción en el tiempo, para esto se decide actualizar el consumo total de la columna considerando diferentes ritmos de explotación y tasas de descuento según la Ilustración 32.

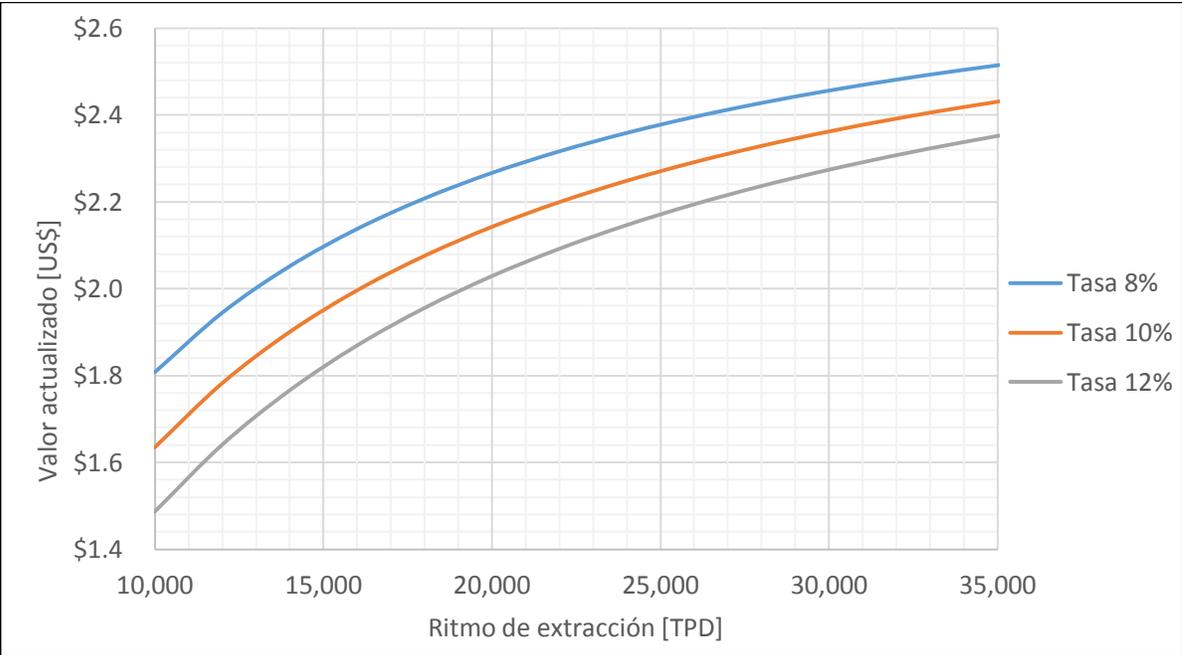


Ilustración 32 Valor actualizado del ahorro operacional

Como se puede apreciar el impacto de este ahorro al costo global del proyecto bordea los dos millones de dólares, lo que es sumamente escaso e incluso no debiese afectar la decisión en términos económicos.

5.3. Conclusiones económicas

El análisis económico presentado es simplemente comparativo por lo que los valores entregados no permiten cuantificar la verdadera magnitud de la inversión o del costo operacional asociado, sin embargo, los análisis sirven para entregar ciertas conclusiones del diseño propuesto.

Cuando se propone construir un Panel Caving Inclinado necesariamente se están construyendo una mayor cantidad de desarrollos horizontales, sin embargo, el diseño propuesto considera también una simplificación de las labores de hundimiento generando una socavación continua que descarta la construcción de bateas, este trade-off hace necesario realizar la comparación económica expuesta anteriormente.

El costo operacional estudiado refleja que a pesar de que el sistema inclinado tiene mayores distancias y tiempos de ciclo asociados a la operación del LHD, su mayor capacidad de balde hace que su costo operacional sea un poco menor que el sistema convencional sin importar el ritmo o tasa de descuento a utilizar.

El análisis comparativo en términos de inversión del método entrega que la variante inclinada de un sistema de caving requiere un mayor desembolso, sin embargo, este aumento de costos parece ser no prohibitivo pues si existiesen ventajas en términos de reservas o de estabilidad la empresa debiese estar dispuesta a invertir 366 [US\$/m²] más en pos de mejorar la seguridad o índices económicos del proyecto.

6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Como el objetivo de este trabajo es diseñar tomando en cuenta variables de estabilidad es necesario realizar un análisis de estabilidad del diseño propuesto y compararlo con la línea base definida. A continuación se realizan análisis en dos y tres dimensiones respectivamente

6.1. Análisis 2D

Para realizar los análisis de estabilidad en dos dimensiones se ocupa el programa Phase2 el cual realiza la modelación mediante elementos finitos. La construcción de los modelos que retratan el perfil transversal de los sistemas (por lo que el esfuerzo principal mayor in-situ escapa del plano), considera una caja de trabajo de más de 4 veces el tamaño de la excavación y condiciones de borde de plano empotrado, los elementos son triángulos de 6 nodos y el tamaño de estos se muestra en la Ilustración 33.

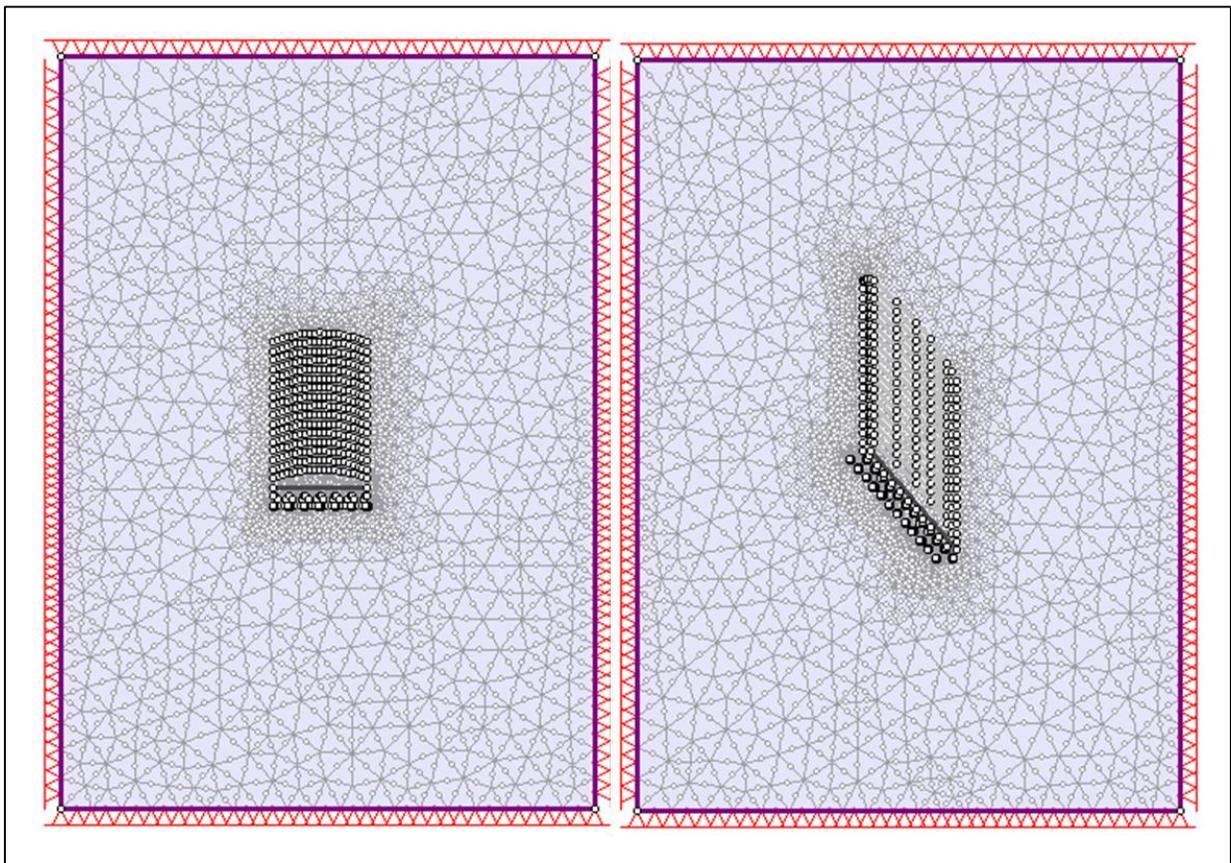


Ilustración 33 Modelos 2D construidos

La medición se realiza cuando la cavidad impuesta es de 300 metros de altura pues en ese momento los esfuerzos inducidos son mayores. En el caso del sistema horizontal los esfuerzos se miden en el centro de cada pilar y en la proyección de esta distancia hacia las afueras de la columna.

En las siguientes ilustraciones se pueden apreciar los resultados de la modelación para los valores de esfuerzo principal máximo, mínimo y deviatórico. Se puede notar que en los bordes del nivel de producción hay una zona altamente afectada por la redistribución de cargas la cual podría ser abordada con un nivel de socavación más ancho que aleje esta sobrecarga.

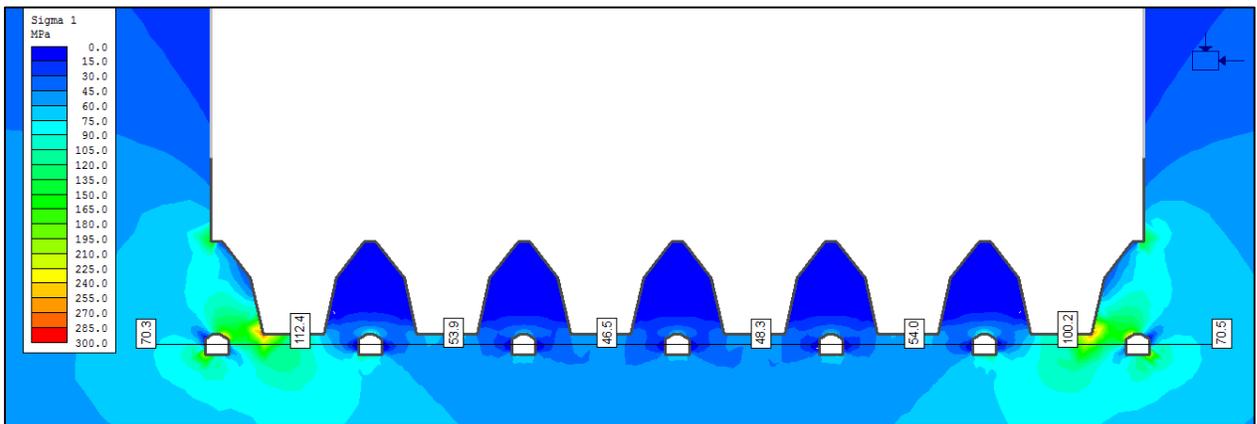


Ilustración 34 Esfuerzo principal mayor para sistema horizontal

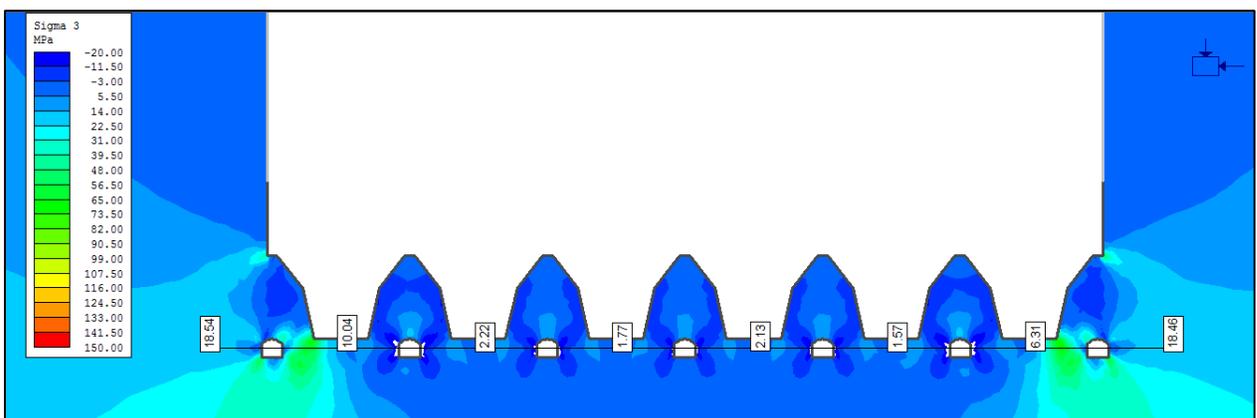


Ilustración 35 Esfuerzo principal menor para sistema horizontal

La interacción entre el esfuerzo mayor y menor queda reflejada en el esfuerzo deviatorico (Ilustración 36), existe una tendencia a reflejar valores en torno a 50 MPa en los pilares que están al centro de la columna.

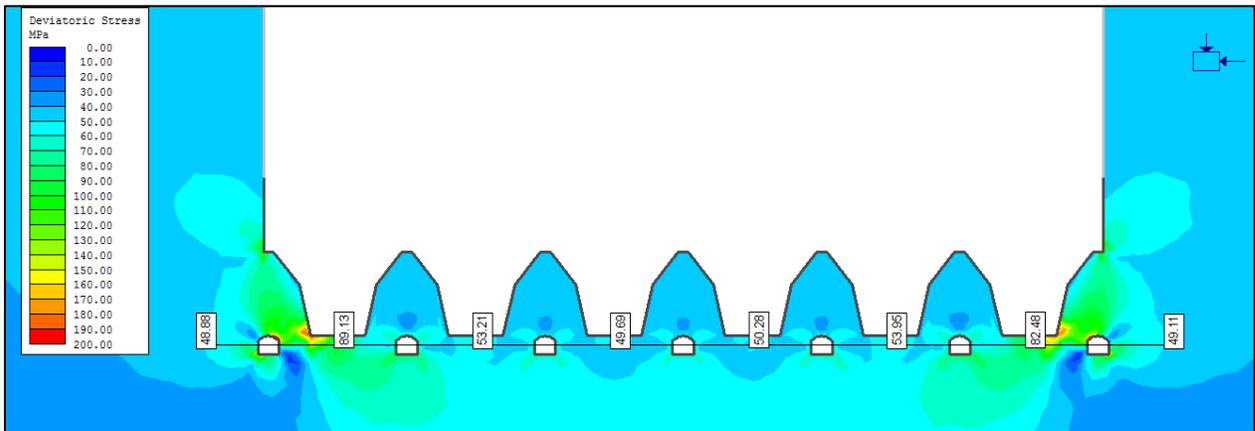


Ilustración 36 Esfuerzo deviatorico para sistema horizontal

A continuación se muestran los mismos resultados para la variante inclinada del sistema, el punto de mayor atención se presenta en la última galería de hundimiento la cual muestra una alta concentración de esfuerzos debido a la redistribución de los esfuerzos in-situ.

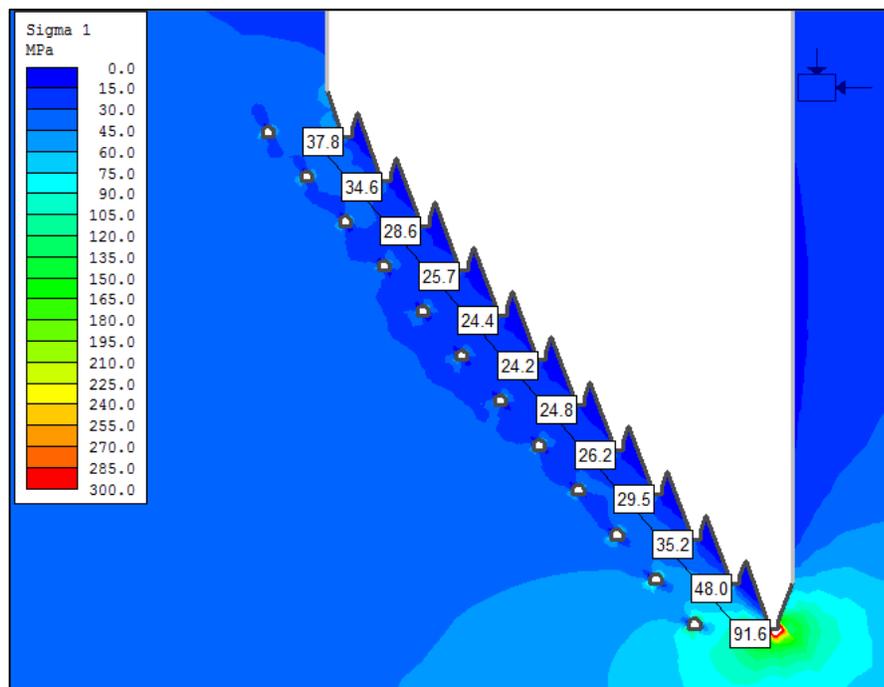


Ilustración 37 Esfuerzo principal mayor en sistema inclinado

Si se compara el esfuerzo principal menor en el sistema inclinado (Ilustración 38) con el obtenido en el sistema horizontal (Ilustración 35) se puede apreciar que en el caso del inclinado los valores son negativos lo que indicaría una situación no confinada del área de producción.

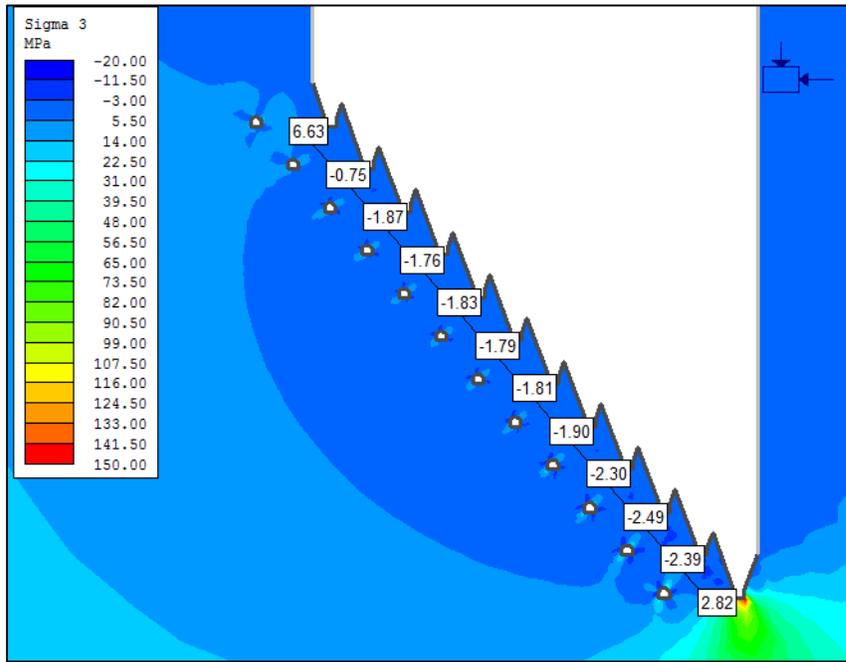


Ilustración 38 Esfuerzo principal menor en sistema inclinado

En la Ilustración 39 se puede apreciar que el esfuerzo deviatorico es en general constante con un gran aumento de valor en la zona inferior del sistema, lo cual se condice con las ilustraciones anteriores.

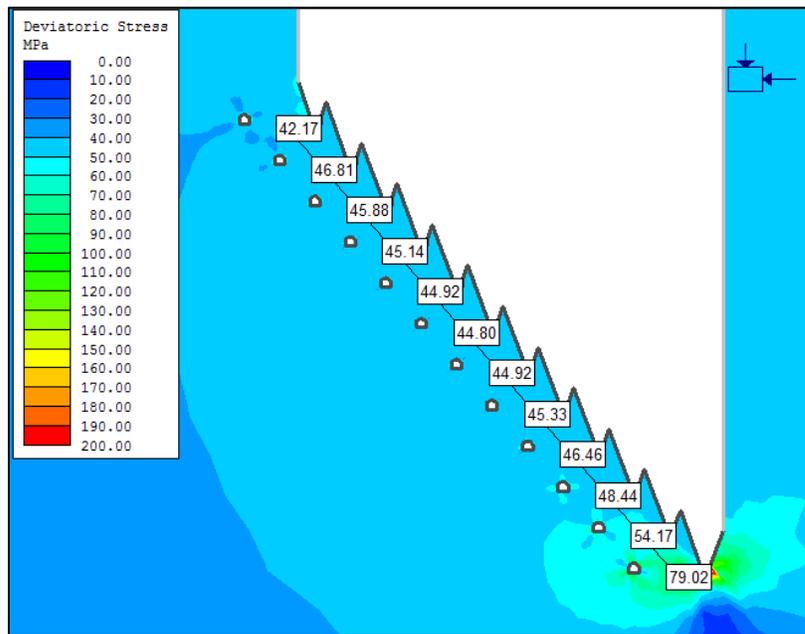


Ilustración 39 Esfuerzo deviatorico en sistema inclinado

Para comparar ambos sistemas se necesita establecer un criterio numérico de comparación pues una escala de colores no entrega una respuesta concisa, para esto en la Ilustración 40 se grafica el esfuerzo deviatorico de cada sistema según la posición de la medición, además se entrega como referencia el umbral de daño definido como 0.4 veces el UCS.

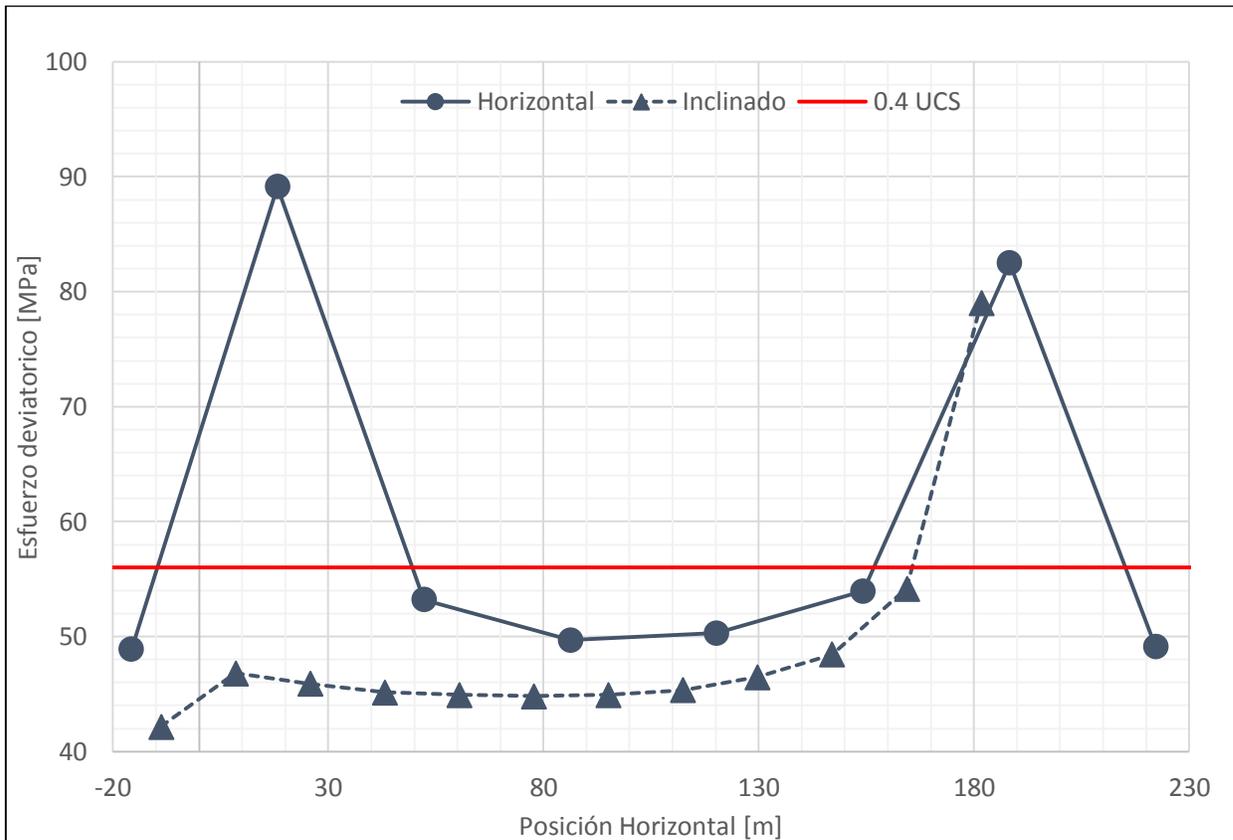


Ilustración 40 Esfuerzo deviatorico para cada sistema según posición

Se puede apreciar que para el plano y puntos de control escogidos el comportamiento posición por posición del sistema inclinado es superior en términos de estabilidad, es necesario recalcar que los extremos del sistema horizontal pueden ser abordados con una mayor área de socavación en el nivel de hundimiento pero el comportamiento de los pilares intermedios no debiese cambiar según ese ensanchamiento.

La condición de deformaciones planas no permite evaluar los perfiles transversales que pudiesen entregar una mejor información con respecto al abutment stress en la zona del nivel de producción por lo que el análisis 2D no puede entregar mayor información con respecto a la situación de los pilares bajo redistribución de esfuerzos.

6.2. Análisis 3D

En paralelo a la realización de este trabajo se efectuó en la empresa consultora GMT (Geomecánica, Minería y Tecnología) el informe “evaluación geomecánica de la variante minera Panel Caving Inclinado” (GMT, 2015), la idea de dicho trabajo es evaluar geomecánicamente las consideraciones de diseño realizadas en el capítulo 4 de este informe.

GMT tomó la decisión de modificar ciertos parámetros del diseño según su experiencia para construir los modelos, los parámetros modificados eran una decisión en base a criterios especificados anteriormente y los cambios se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 Modificación de parámetros

Parámetro	Valor Inicial	Valor Modificado
Largo del pilar [m]	30	25
Distancia vertical entre niveles [m]	20	17.32

El cambio de la distancia vertical entre niveles supone una variación en el ángulo global del diseño disminuyéndolo a 45°, estas modificaciones al diseño al ser relativamente pequeñas no invalidan el estudio realizado pues de todas maneras se espera sacar conclusiones con respecto a la estabilidad del sistema.

En esta sección del informe se mostrarán, en un principio, los modelos y los resultados gráficos de este para luego definir zonas de control y entregar resultados numéricos que puedan aportar de una manera más objetiva la estabilidad de los sistemas comparados.

6.2.1. Modelo Panel Caving Convencional

El sistema horizontal fue modelado en el tamaño en el cual representa un radio hidráulico de 38 metros y se encuentra conectado a un nivel previamente explotado de 700 metros. Para desarrollar esto fue necesario crear una caja de 3120 x 3120 x 1500 m (ancho x largo x altura) con 2.1 millones de elementos y el modelo esta empotrado en todas sus caras exceptuando la tapa superior que se encuentra libre. En la Ilustración 41 se puede apreciar como la cavidad proyectada conecta con el nivel previamente explotado en la cota -700 considerando que el nivel de hundimiento se encuentra a mil metros de profundidad.

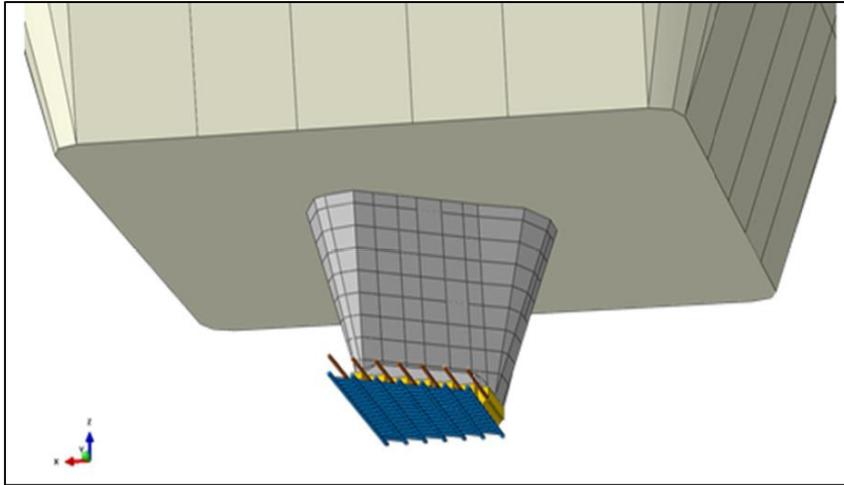


Ilustración 41 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Convencional con cavidad superior

Al tratarse de un Panel Caving Convencional se definió que por cada línea de bateas debe existir un cajón abierto no conectado al nivel de hundimiento, además el frente de extracción se encuentra en el centro de las bateas ya completamente conectadas y se conecta con el frente de régimen mediante una nariz que oscila entre los 30° y 45° , este modelo se aprecia en la Ilustración 42.

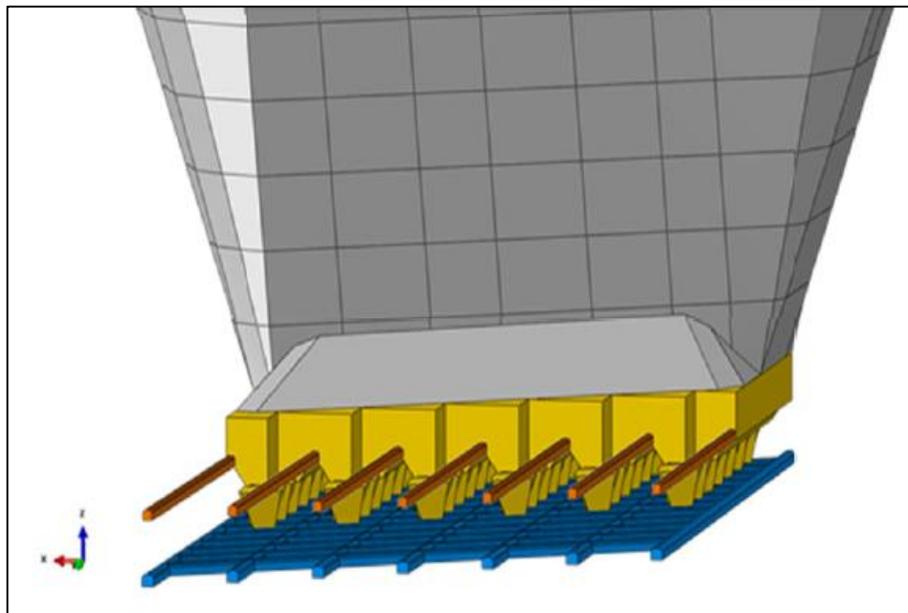


Ilustración 42 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Convencional

En la Ilustración 43 se puede apreciar el factor de seguridad en el nivel de producción considerando una vista en planta, además se representa con una línea negra el frente de hundimiento el cual avanza desde izquierda a derecha de la imagen expuesta.

Es necesario aclarar que los sectores iniciales y extremos de la construcción no serán considerados en el análisis de estabilidad pues estas fallas de estabilidad se abordan con soluciones del tipo ensanchar hundimiento o incluir medias zanjas que no fueron consideradas en la construcción del modelo, una vez aclarado lo anterior, los análisis se fijan en la parte central que se encuentra en el sector del frente de hundimiento lugar en el cual el abutment stress disminuye la estabilidad de los pilares.

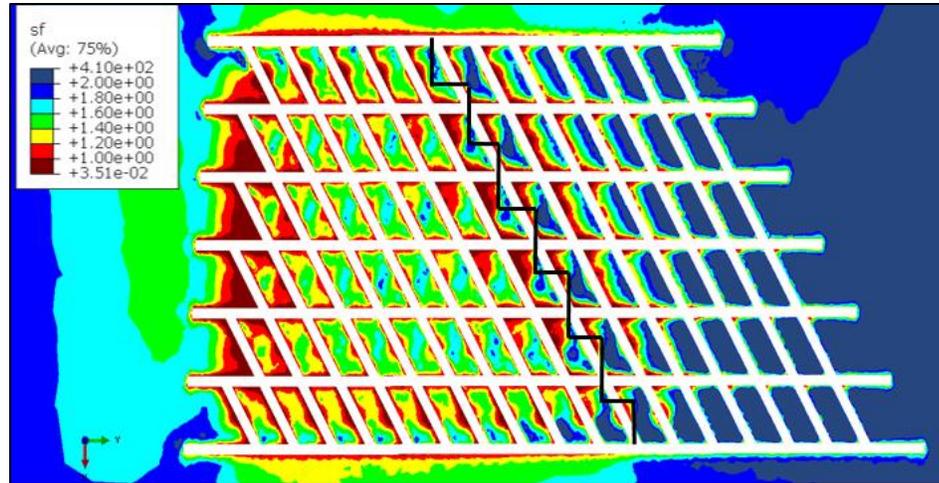


Ilustración 43 Vista en planta del factor de seguridad para la cota 1 metro sobre el nivel de producción del modelo Panel Caving Convencional

En la vista perfil del factor de seguridad (Ilustración 44) se puede apreciar como la redistribución de esfuerzos se transfiere al nivel de producción lo cual afectará a la estabilidad de este.

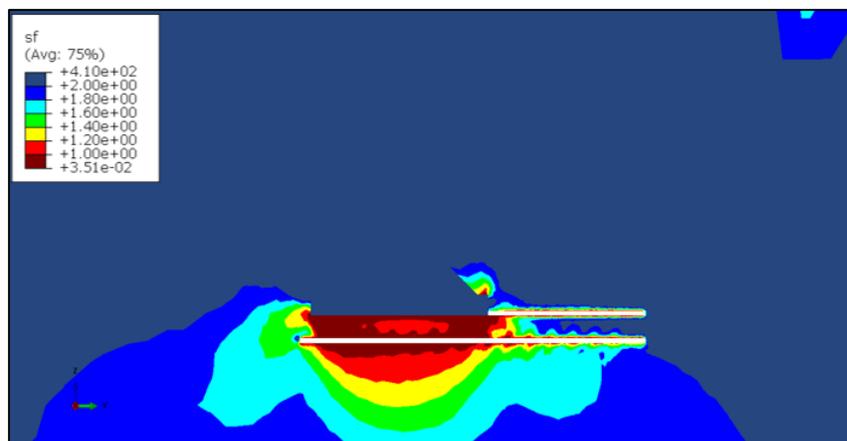


Ilustración 44 Vista longitudinal del factor de seguridad para corte longitudinal en centro de galerías del modelo Panel Caving Convencional

6.2.2. Modelo Panel Caving Inclinado

Para el modelo inclinado se consideró el mismo tamaño de caja contenedora y las mismas condiciones de borde, pero en este caso el número de elementos aumenta a 3.2 millones. Para no castigar las reservas se establece que el nivel intermedio coincide en cota con el nivel de producción del sistema horizontal y nuevamente se conecta con una cavidad preexistente lo que se muestra en la Ilustración 45. El radio hidráulico se define de la misma magnitud que el sistema anterior considerando el área proyectada en la vertical pues es esa área abierta la que induce el hundimiento.

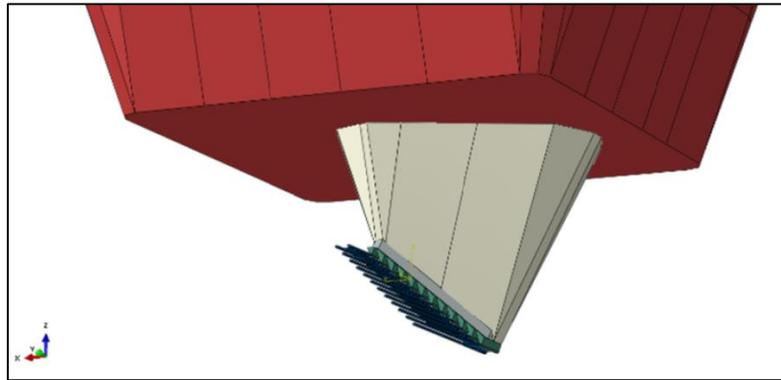


Ilustración 45 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Inclinado con cavidad superior

La nariz de extracción nuevamente se considera entre 30° y 45° a lo largo del frente de extracción, considerando además un cambio de orientación debido a la geometría diferente del nivel superior (Ilustración 46).

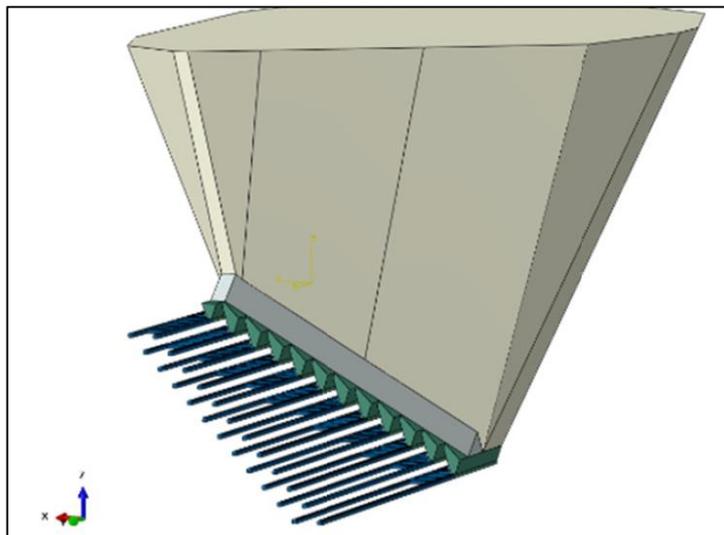


Ilustración 46 Vista isométrica modelo construido Panel Caving Inclinado

En la Ilustración 47 se muestra el factor de seguridad en una vista planta del nivel intermedio del sistema inclinado, la parte oscura superior corresponde al material quebrado que rellena la cavidad proyectada desde los niveles inferiores y además se puede apreciar como existe una concentración de esfuerzos en el sector del frente de hundimiento.

Nuevamente la sección posterior del caving tiene bajos niveles de estabilidad, pero estos no serán considerados pues al igual que el caso anterior al ser un sector estático se pueden crear medidas de mitigación de estos esfuerzos, como por ejemplo, aumentar el largo de socavación en ese sector.

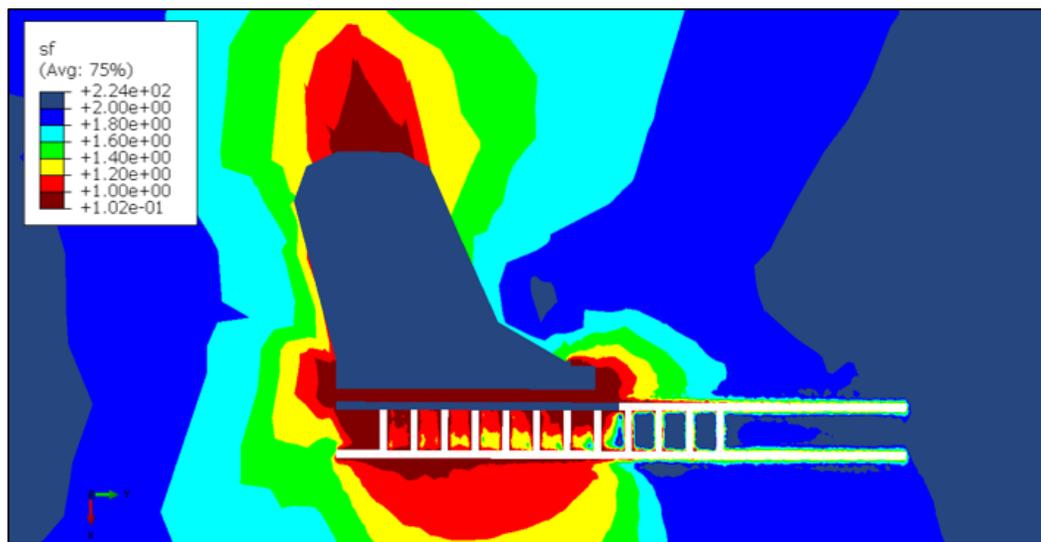


Ilustración 47 Vista en planta del factor de seguridad para cota -85.6 metros (nivel intermedio) del modelo Panel Caving Inclinado

La vista longitudinal de la Ilustración 48 muestra como cambia el factor de seguridad en la altura para un corte en el centro de las galerías centrales del modelo. La imagen muestra una galería de hundimiento, estocadas del nivel contiguo y la galería de producción del nivel subsiguiente, en ella se puede apreciar la redistribución del abutment stress a los niveles inferiores del sistema y como este afecta a la estabilidad del sector.

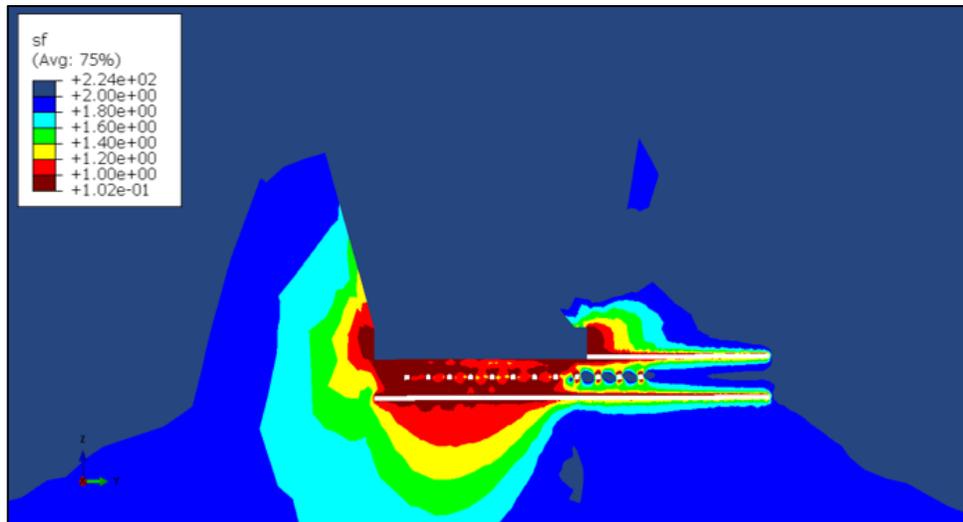


Ilustración 48 Vista longitudinal del factor de seguridad para corte longitudinal en centro de galerías del modelo Panel Caving Inclinado

6.2.3. Resultados galería de producción

La zona de control para evaluar este sector considera un área de expansión de tres metros en dirección vertical y horizontal para la galería de producción central de ambos sistemas, el largo de toma de datos es de 20 metros por debajo del frente de socavación hasta los 60 metros por sobre este. En la Ilustración 49 e Ilustración 50 se puede apreciar la zona mencionada anteriormente.

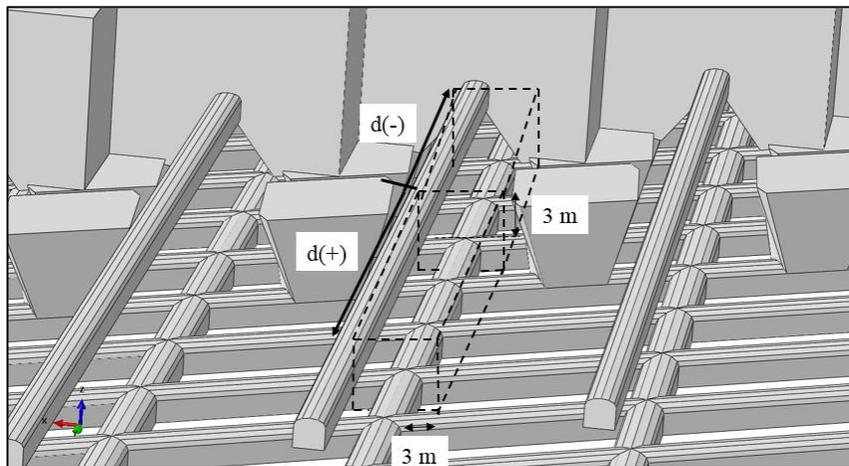


Ilustración 49 Zona de control galería de producción del modelo Panel Caving Convencional

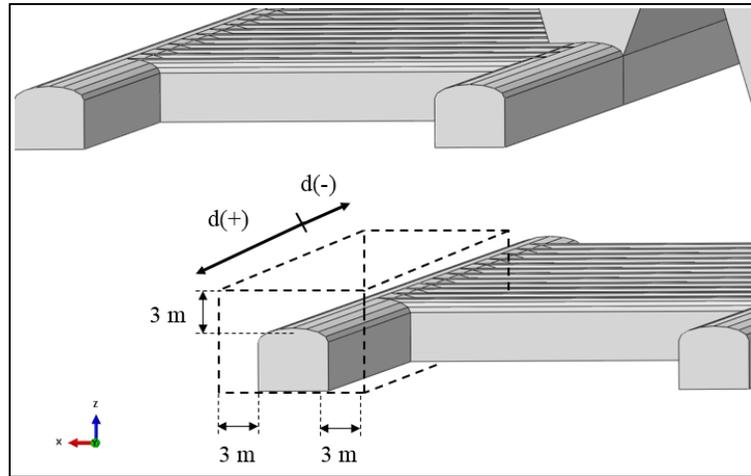


Ilustración 50 Zona de control galería de producción del modelo Panel Caving Inclinado

Los resultados se expresan en términos del factor de seguridad a lo largo de la zona de control (Ilustración 51) y en ellos se puede apreciar que a medida que la medición se aleja del frente de hundimiento comienza a ser más estable. Para ambos casos la tendencia es que la estabilidad de las galerías de producción que se encuentran bajo el frente de hundimiento es deficiente.

El foco del trabajo es encontrar parámetros de comparación entre ambos sistemas y para el caso de la galería de producción no se aprecian diferencias significativas entre ambos sistemas evaluados.

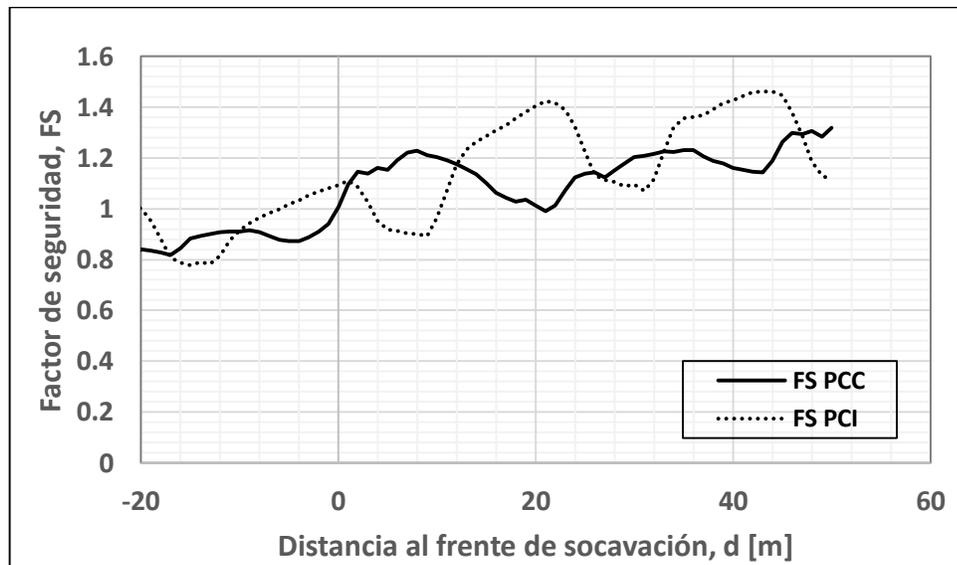


Ilustración 51 Evolución del factor de seguridad en la galería de producción con respecto a la distancia al frente de socavación

6.2.4. Resultados galería hundimiento

Nuevamente la zona de control para evaluar este sector se considera un área de expansión de tres metros en dirección vertical y horizontal para la galería de hundimiento central de ambos sistemas y el largo de toma de datos es de 60 metros desde el frente de socavación. En la Ilustración 52 e Ilustración 53 se puede apreciar la zona descrita.

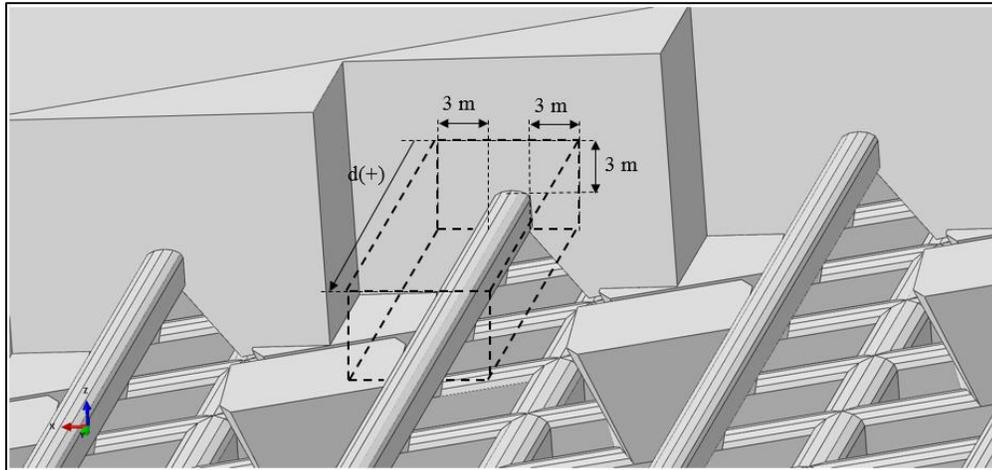


Ilustración 52 Zona de control galería de hundimiento del modelo Panel Caving Convencional

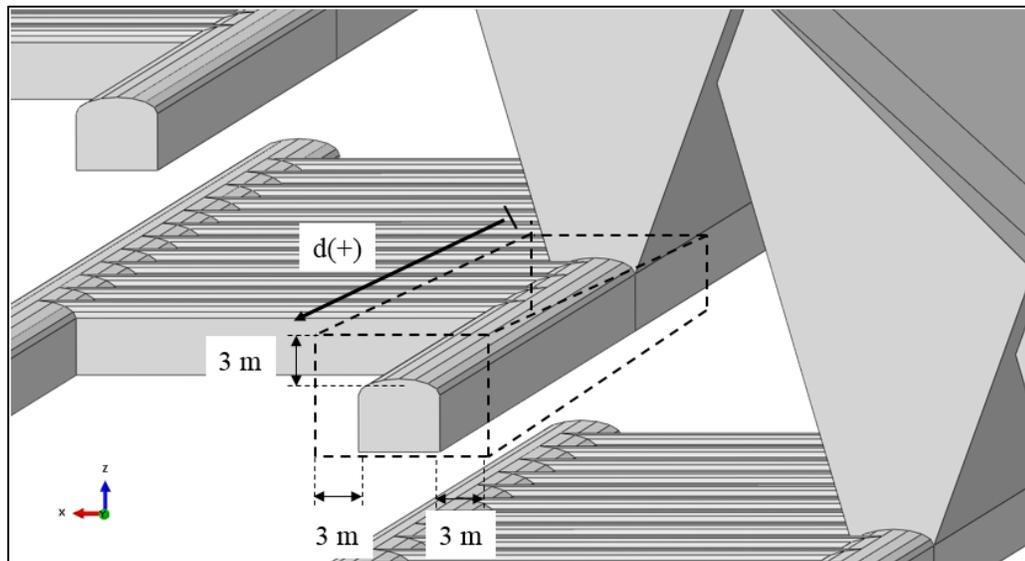


Ilustración 53 Zona de control galería de hundimiento del modelo Panel Caving Inclinado

En la Ilustración 54 se puede notar como aumenta el factor de seguridad a medida que la galería de hundimiento se aleja del frente de socavación, en esta ocasión se puede apreciar una clara tendencia a la inestabilidad del sistema inclinado en este sector de

las labores. La menor estabilidad está asociada a una condición de esfuerzos desfavorable, lo que corresponde con lo apreciado en el análisis 2D expuesto en la Ilustración 40.

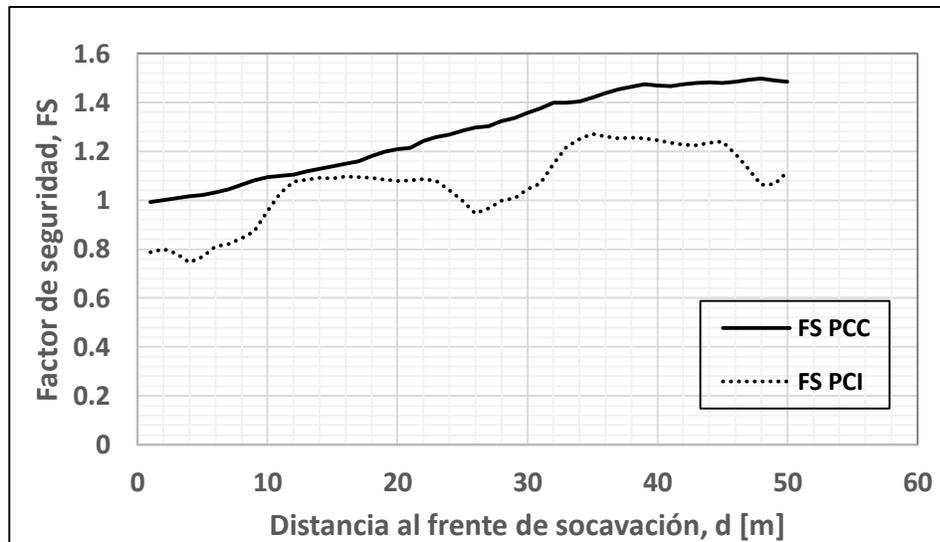


Ilustración 54 Evolución del factor de seguridad en la galería de hundimiento con respecto a la distancia al frente de socavación

6.2.5. Resultados estocadas

Para el análisis de las estocadas se deben elegir las dos que representen las condiciones más desfavorables en términos de estabilidad y estas corresponden a las más cercanas al frente de hundimiento. Nuevamente la zona de control está definida por una expansión en tres metros en sentido horizontal y vertical. La Ilustración 55 e Ilustración 56 muestran lo anteriormente expuesto.

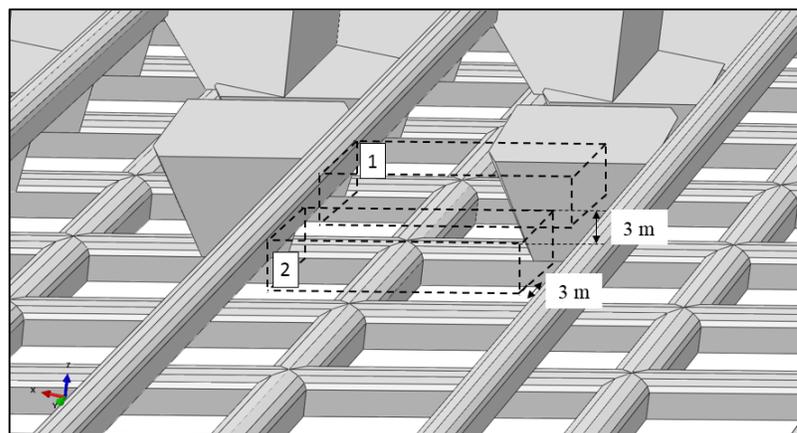


Ilustración 55 Zona de control estocadas del modelo Panel Caving Convencional

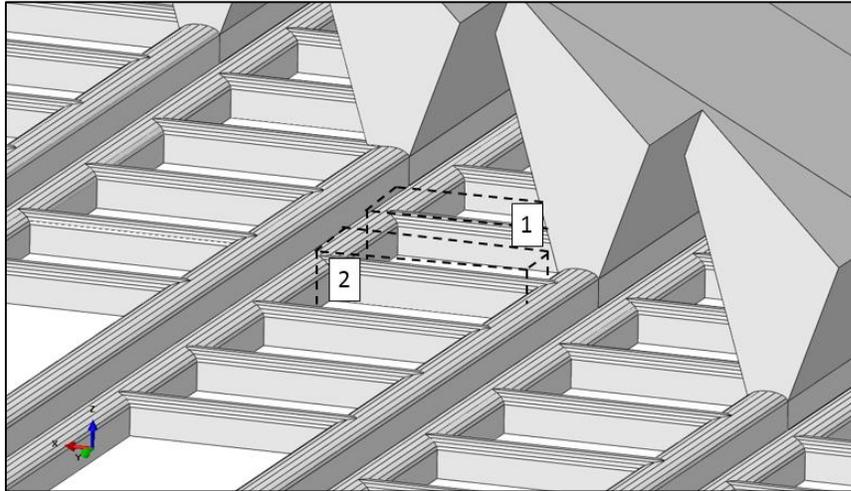


Ilustración 56 Zona de control estocadas del modelo Panel Caving Inclinado

En la Ilustración 57 se puede apreciar que para ambos sistemas la primera estocada que se encuentra detrás del frente de hundimiento posee problemas de estabilidad, siendo aún más preocupante el caso de la variante inclinada en la cual en ningún momento posee un factor de seguridad mayor a uno, es necesario recalcar que la mayor distancia a batea para el caso convencional significa estar muy cerca de la batea contigua, razón que explica el por qué cuando se aleja de la primera batea el factor de seguridad desciende considerablemente.

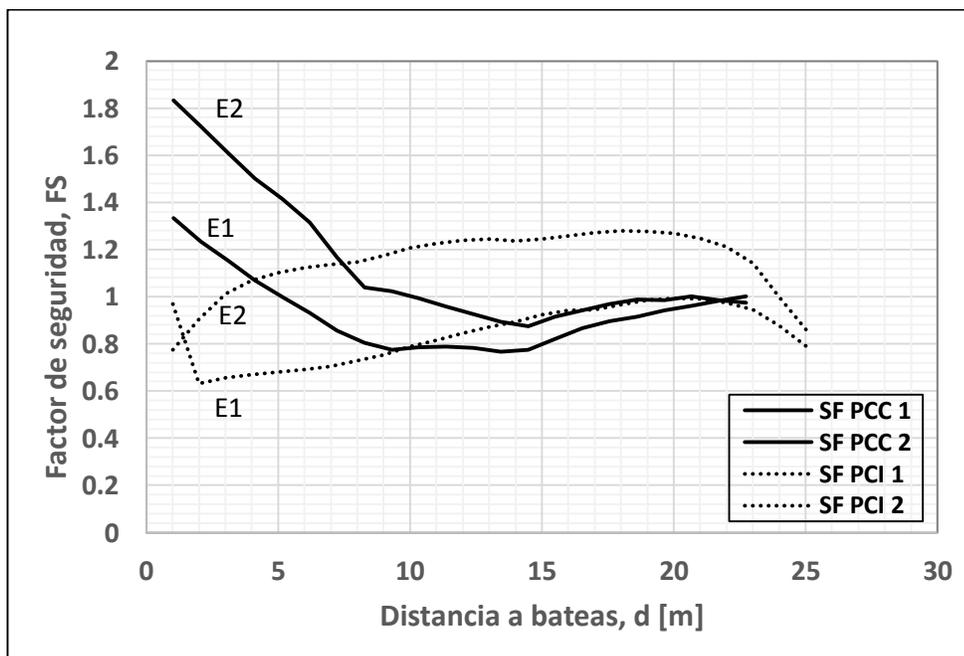


Ilustración 57 Evolución del factor de seguridad en las estocadas con respecto a la distancia a bateas

6.2.6. Resultados estabilidad pilar

La zona de control en el caso del estudio de la estabilidad de los pilares está definida por los pilares que se ven afectados por el abutment stress en el sector céntrico del modelo. Se considerarán cuatro pilares, uno de los cuales estará por detrás del frente de hundimiento y la zona de control será de 3.5 metros de altura desde la base de las galerías. En la Ilustración 58 e Ilustración 59 se pueden apreciar claramente los pilares estudiados.

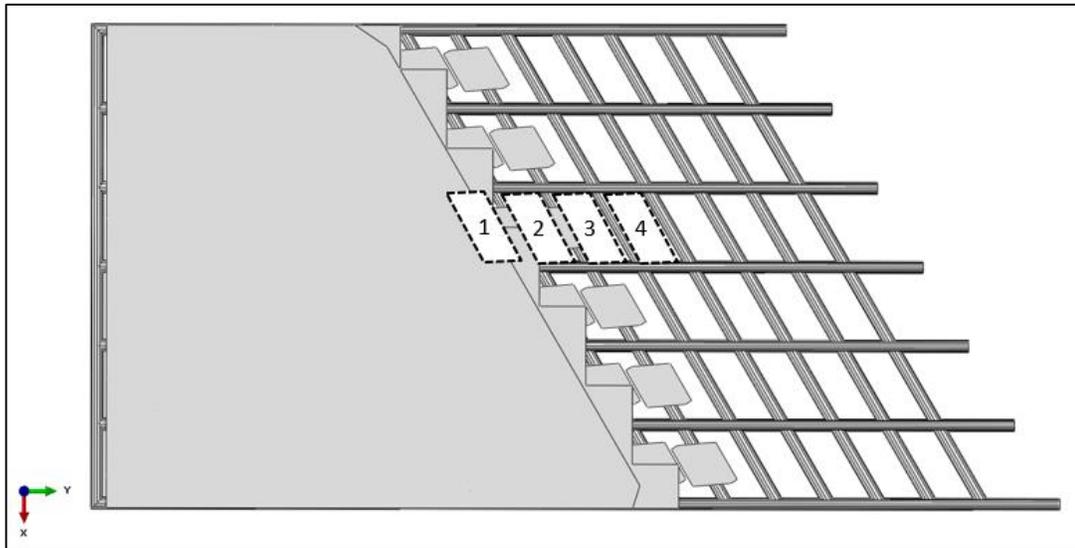


Ilustración 58 Zonas de control utilizadas en pilares de producción del modelo Panel Caving Convencional

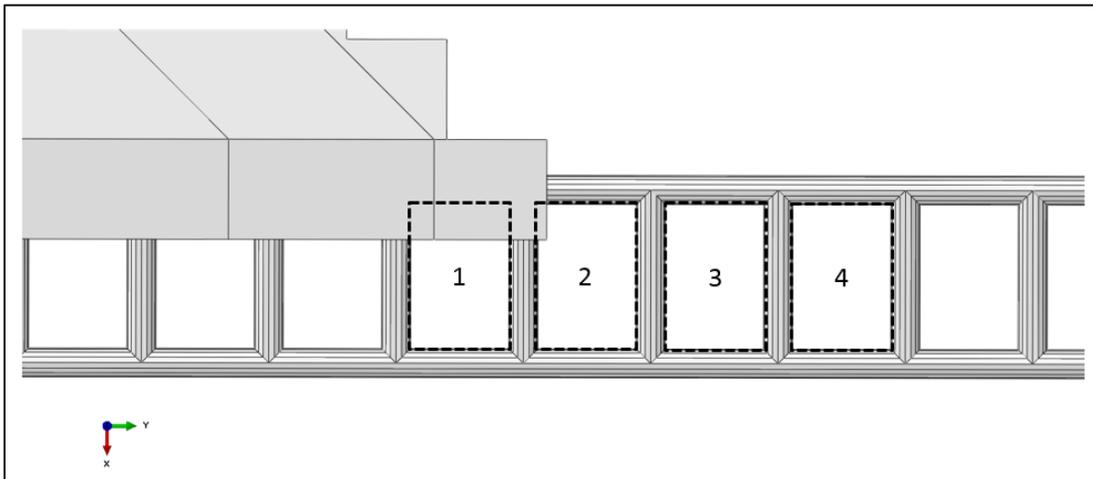


Ilustración 59 Zonas de control utilizadas en pilares de producción del modelo Panel Caving Inclinado

En la Ilustración 60 se pueden ver los resultados comparativos del factor de seguridad para los cuatro pilares evaluados, es esperable que los pilares cercanos al frente de hundimiento tengan una menor estabilidad y es en este sector del modelo donde se deben sacar las mayores conclusiones comparativas. El sistema inclinado tiene peores índices de estabilidad en el sector más conflictivo, razón por la cual se concluye un peor comportamiento de la variante inclinada para este análisis.

La mayor estabilidad de los pilares lejanos tienen sentido por el tamaño de estos, sin embargo, este mayor tamaño no pudo contrarrestar la peor condición de esfuerzos presente en la zona cercana al frente de hundimiento.

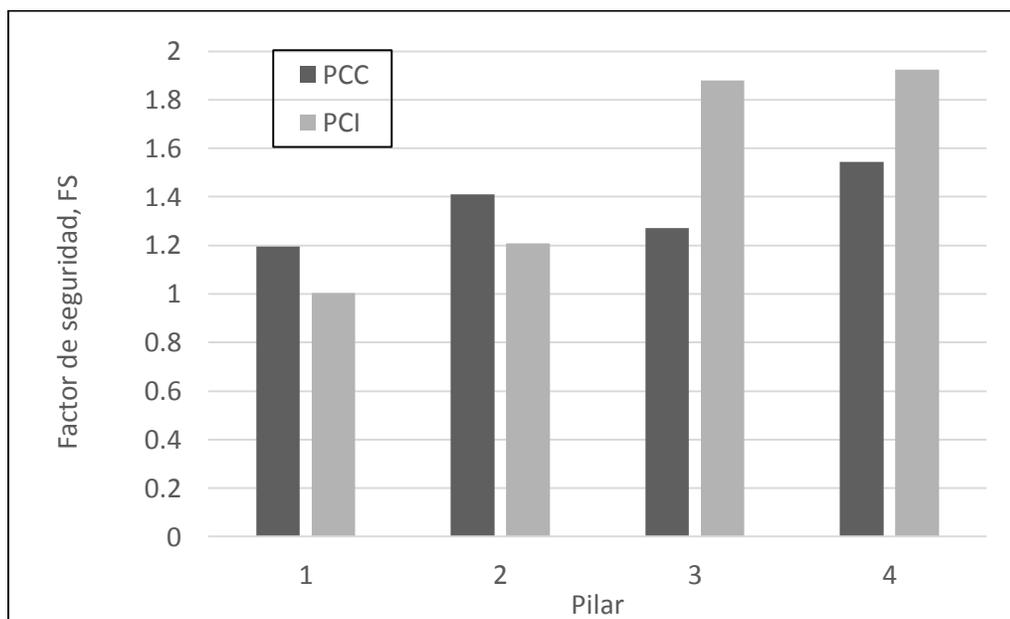


Ilustración 60 Factor de seguridad en la zona de control utilizada en pilares de producción

6.3. Conclusiones de estabilidad

Las características del diseño propuesto afectan la validez del análisis 2D, sin embargo, sirve como primera aproximación a la reorientación de los esfuerzos en una construcción de las características evaluadas. La imposibilidad de reflejar el perfil longitudinal de un Panel Caving Inclinado no permite evaluar la magnitud del abutment stress para una socavación inclinada.

El análisis de estabilidad en tres dimensiones efectuado para la galería de producción no permite concluir acerca de la estabilidad de esa zona en particular, sin embargo, las tres zonas restantes representan una disminución de la estabilidad cuando el

hundimiento se realiza de manera inclinada, siendo el caso más concluyente la galería de hundimiento que se enfrenta al esfuerzo principal medio de manera directa y que además posee mayores dimensiones debido a los equipos que por ahí deben transitar.

Para esta condición de esfuerzos se concluye que el Panel Caving Convencional analizado presenta mejores indicadores de estabilidad que la variante inclinada del mismo método.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el último tiempo ha existido un interés de la industria por estudiar la aplicación de sistemas inclinados de hundimiento para distintas minas alrededor del mundo, ya sean yacimientos de roca débil o inclinados, sin embargo, no existe experiencia en la gran minería de la utilización de este tipo de método, razón por la cual, este trabajo se considera un aporte al conocimiento de esta variante minera.

El diseño de un Panel Caving Inclinado como el realizado en este informe requiere conocer metodologías de diseño de Sublevel Caving para la etapa de iniciación del hundimiento y Panel Caving para la etapa de producción normalizada del sistema la cual tendrá una mayor duración en el tiempo, por lo tanto, para poder diseñar y llevar a cabo una extracción de este tipo será necesario mezclar experiencias de distintas áreas de la industria las cuales generalmente no tienen relación entre ellas.

Es necesario entender que si se busca abarcar la misma cantidad de área que se consigue en un Panel Caving Convencional utilizando la variante minera Panel Caving Inclinado, necesariamente se requerirá de una mayor cantidad de infraestructuras mineras pues una calle de producción en el método inclinado accede a la mitad de puntos que conecta una calle de producción en el sistema convencional.

El diseño propuesto permite realizar la socavación mediante un proceso continuo, sin interacciones con las otras labores de preparación y con un procedimiento muy parecido a la operación de un Sublevel Caving. El largo de perforación máximo para llevar a cabo este diseño es de 37 metros y si se considera el aumento en el diámetro de perforación no debiesen ocurrir mayores problemas asociados a la desviación de los tiros.

La mayor cantidad de infraestructura minera que trae consigo el Panel Caving Inclinado lo convierte en un método de mayor desembolso en la etapa de inversión de capital principalmente por la mayor cantidad de metros construidos en galerías de producción, hundimiento y estocadas, sin embargo, la ausencia de bateas permite que el crecimiento de la inversión no sea excesivo fijando el aumento en 366 [US\$/M²] costo que es posible abordar en el caso de obtener otras ventajas con el cambio de método.

En la actualidad los equipos LHD tienen la limitante del largo para ser ocupados en la minería por Block o Panel Caving, no se recomienda que estos equipos carguen en diagonal, pero a la vez se desea que por cada carguío lleven mayor material. Con

estocadas del largo como la propuesta se podrían desarrollar equipos que ocupen toda su capacidad de levante en tolvas más largas que aprovechen este potencial del equipo, logrando así, disminuir el costo operacional del proceso de carguío.

En el trabajo se pudo apreciar que la variante inclinada tiene peores índices de estabilidad que el sistema convencional para esta condición de esfuerzos particular, pero si se considera que la recomendación general para cualquier tipo de excavación es orientar la cara más pequeña al esfuerzo principal mayor, se puede suponer que para una orientación de esfuerzos semi-vertical el Panel Caving Inclinado tenderá a enfrentar de mejor manera la redistribución de esfuerzos que un sistema convencional.

El análisis de estabilidad 2D queda limitado al perfil transversal del modelo sin poder reflejar el abutment stress de este, por esta razón, los resultados obtenidos se contradicen con los obtenidos en el análisis 3D. Esta limitante dificulta la posibilidad de evaluar diferentes configuraciones, pues los tiempos de construcción y evaluación de modelos en tres dimensiones son mucho mayores a los necesarios para evaluar un modelo 2D.

El Panel Caving Convencional utilizado como línea base de comparación es un diseño que fue específicamente optimizado para una condición de esfuerzos muy similar a la evaluada en este estudio, por lo que se puede esperar que ciertas modificaciones al sistema inclinado mejoren sus índices de estabilidad para esta condición de esfuerzos.

Si se decidiese aumentar aún más el tamaño del pilar para mejorar la estabilidad, castigando así fuertemente los costos de inversión y operación, es esperable que mejoren levemente la estabilidad de las galerías de producción, estocadas y pilares de producción, sin embargo, la galería de hundimiento seguirá enfrentándose al esfuerzo principal intermedio sin importar lo lejana que esté la galería de producción con respecto a esta.

Una operación del estilo Panel Caving Inclinado trae consigo ventajas y desventajas que deben ser evaluadas para poder entregar con mayor certeza un costo de inversión y operación, por ejemplo, el tener un largo de estocada superior puede tener ventajas en la interacción de la producción con las operaciones de descolgadura y reducción secundaria pero el traslado de equipos LHD entre niveles puede afectar la mecánica del equipo, este tipo de cambios deben ser evaluados para entregar con mayor precisión los parámetros económicos y productivos del método.

La operación de ventilación está fuera de los alcances del estudio pero es necesario enunciar ciertas proyecciones que se pueden hacer con respecto a su funcionamiento. Por la mayor cantidad de infraestructura minera, es esperable que el nivel de ventilación en un sistema inclinado sea de mayor tamaño que el usado en el método convencional, además si la estocada es muy larga se debe estudiar cuales son las condiciones de ventilación en el punto de extracción y en el caso de ser deficientes se debe proponer como realizar la ventilación forzada.

Como se generó un sistema de socavación en base a un método de explotación, es esperable que el proceso de hundimiento se produzca a una mayor velocidad, si a eso se suma que la iniciación del hundimiento se realiza por el sector de columnas pequeñas se recomienda evaluar mediante simulaciones las interacciones de las etapas para así tener una noción de la velocidad de avance del frente de hundimiento y verificar si existe una ventaja con respecto a la posible pronta liberación de la tasa de extracción por restricciones geomecánicas.

El diseño propuesto puede adoptar diferentes distancias entre niveles lo que permite variar el ángulo sin modificar sustancialmente el sistema de extracción, para el caso de la malla evaluada el ángulo global varía entre 16° y 65° lo que permite adaptarse a yacimientos inclinados incorporando una mayor cantidad de reservas o disminuyendo la dilución planificada según sea el caso.

El flujo de material quebrado fue abordado como en un sistema convencional, sin embargo, si se quisiese hacer depender el diámetro del elipsoide según la altura de columna de cada nivel bastaría con acercar o alejar horizontalmente cada nivel para así abordar los problemas de recuperación y tiraje aislado de cada uno de los niveles a construir.

8. BIBLIOGRAFÍA

Arce, J. (2002). Dimensionamiento de distancias entre puntos de extracción y niveles de producción - socavación para método panel caving en roca primaria mina El Teniente. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Atlas Copco. (2015). *Cargadoras subterráneas (LHD)*. Recuperado el 26 de febrero de 2015, de <http://www.atlascopco.cl/cles/products/equipo-de-carga-y-transporte/1401308/>

Atlas Copco. (2015). *Equipos de perforación de barrenos largos*. Recuperado el 26 de febrero de 2015, de <http://www.atlascopco.cl/cles/products/equipos-de-perforaci%C3%B3n-y-martillos/1401331/>

CAT. (2015). *Underground Mining LHD Loaders*. Recuperado el 26 de Febrero de 2015, de http://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders.html

Cavieres, P. (1999). Evolución de los Métodos de Explotación en la Mina El Teniente. Santiago: Univeridad de Chile.

Díaz, G., & Tobar, P. (2000). Panel Caving Experiences and Macrotrench - An alternative Exploitation Method at the El Teniente Mine, Codelco-Chile. En G. Chitombo (Ed.), *Massmin 2000* (págs. 235-248). Brisbane.

GMT. (2015). Análisis de estabilidad y evaluación geomecánica de la variante minera panel caving con hundimiento convencional y su aplicabilidad en el proyecto nuevo nivel mina división el teniente. Rancagua: Codelco Chile.

GMT. (2015). Evaluación geomecánica de la variante minera panel caving inclinado e impacto del fracturamiento hidráulico en la hundibilidad de la columna. Santiago: Codelco Chile.

Hustrulid, W., & Kvapil, H. (2008). Sublevel caving - past and future. En *MassMin 2008*. Lulea, Suecia.

Jakubec, J., & Laubscher, D. (2012). Incline Cave Mining – A Viable Alternative to Horizontal Layout. En *MassMin 2012*. Sudbury, Canadá.

Karzulovic, A. (2001). *Altura de roca primaria en minería por panel caving*. Rancagua, Chile: División El Teniente.

Laubscher, D. A. (2003). *Cave Mining Handbook*. Johannesburg: De Beers.

Paucar, M., & Mthombeni, C. (2004). Incline cave: A technical alternative method to mine kimberlite deposits at depth. En A. Karzulovic, & M. Alfaro (Edits.), *MassMin 2004* (págs. 91-95). Santiago.

Player, J. (2001). Longitudinal Sublevel Caving, Big Bell Mine. En *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. (págs. 371-380). Littleton, Colorado, USA: Society of Mining, Metallurgy and Exploration.

Quinteiro, C., & Fjellborg, S. (2008). Measurements of borehole deviation in Sublevel caving fans at Kiruna Mine. En *MassMin 2008*. Lulea, Suecia.

Sandvik. (2015). *Underground loaders (LHDs)*. Recuperado el 26 de febrero de 2015, de http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Portals*5CProducts*5CLoad*and*hau

SKM minmetal. (2007). Selección tamaño de palas LHD, ingeniería conceptual nuevo nivel mina, El Teniente. Santiago, Chile.

Steffen, Robertson, & Kirsten. (1997). *Informe Evaluación Geomecánica del Método de Explotación Macrozanja*. Codelco Chile - Division el Teniente. Santiago: skn.

Valencia, J., Paredes, P., & Macías, F. (2014). La encantada: An inclined cave design. En R. Castro (Ed.), *Caving 2014* (págs. 217-224). Santiago.

Walther, F. (1988). Hundimiento por Bloques con L.H.D. en un nivel para Mina el Salvador.

9. ANEXO A – LÍNEA BASE DE COMPARACIÓN

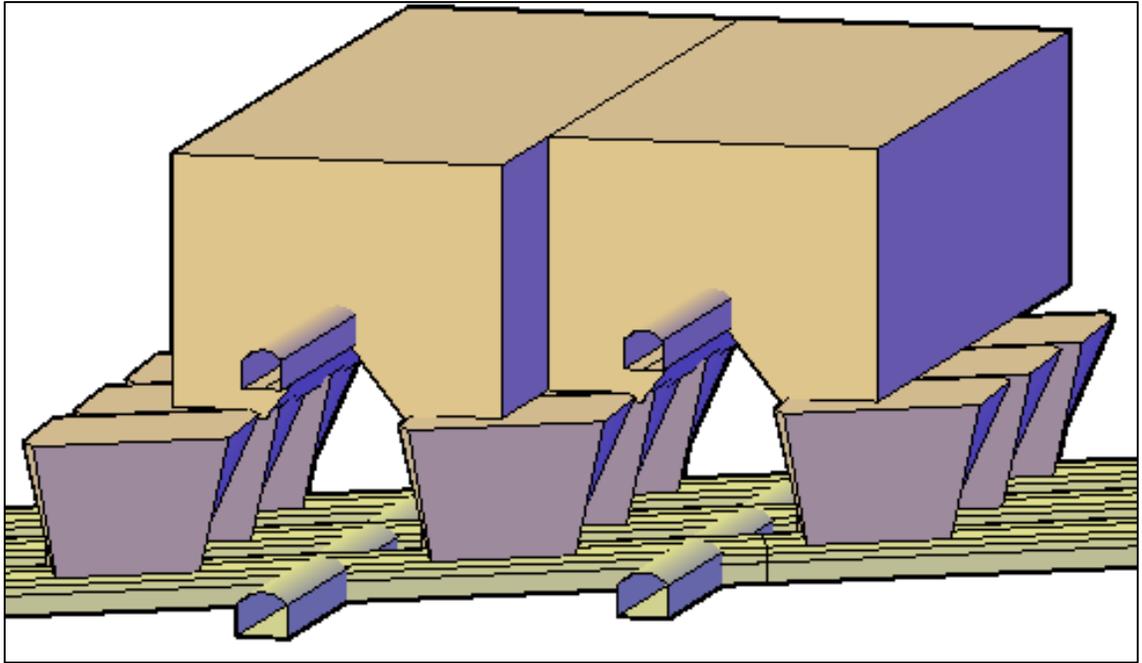


Ilustración 61 Vista isométrica diseño Panel Caving Convencional

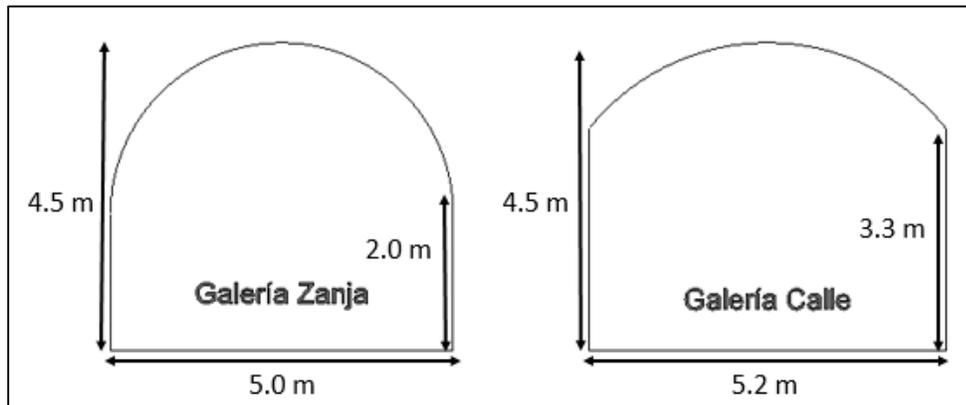


Ilustración 62 Galerías zanja y calle del PCC

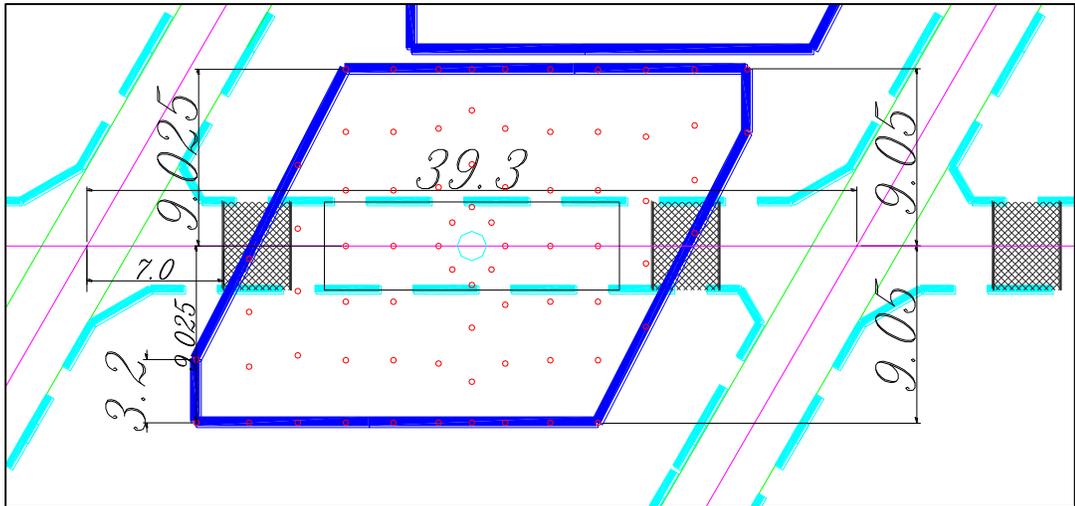


Ilustración 63 Dimensiones de la batea en planta

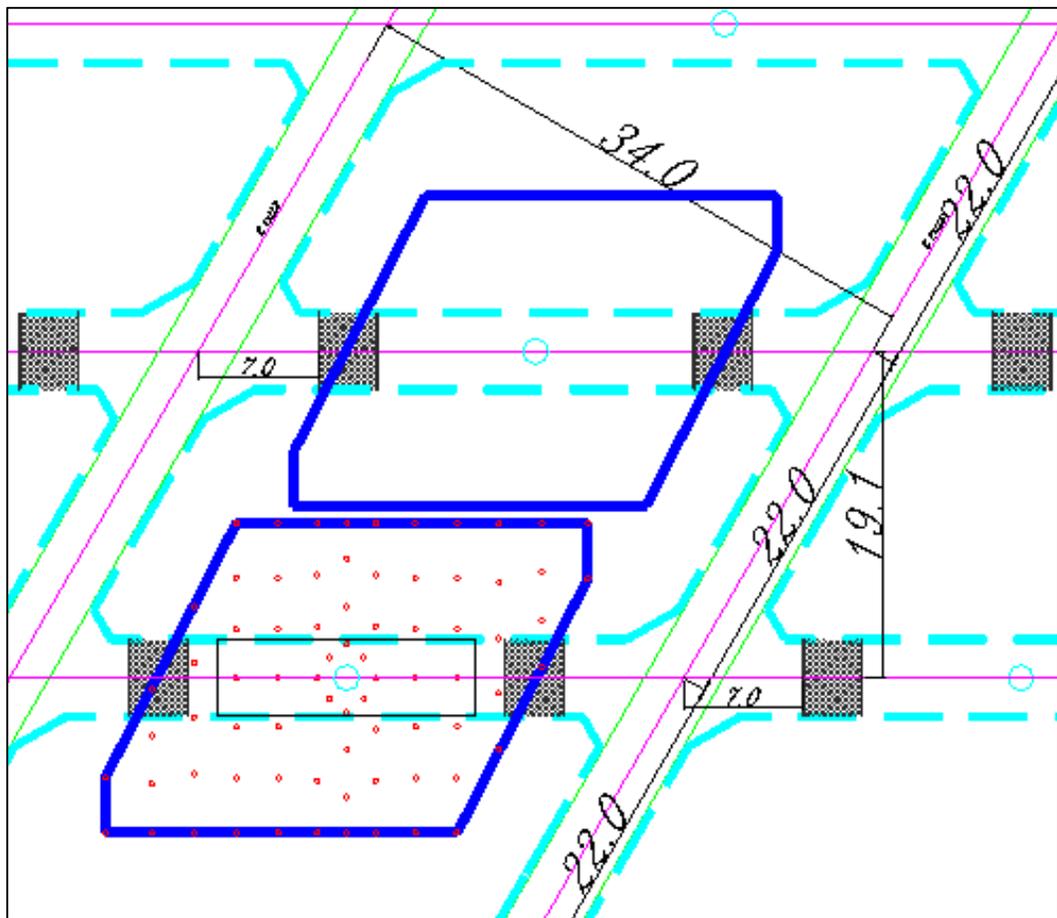


Ilustración 64 Dimensiones de la malla utilizada

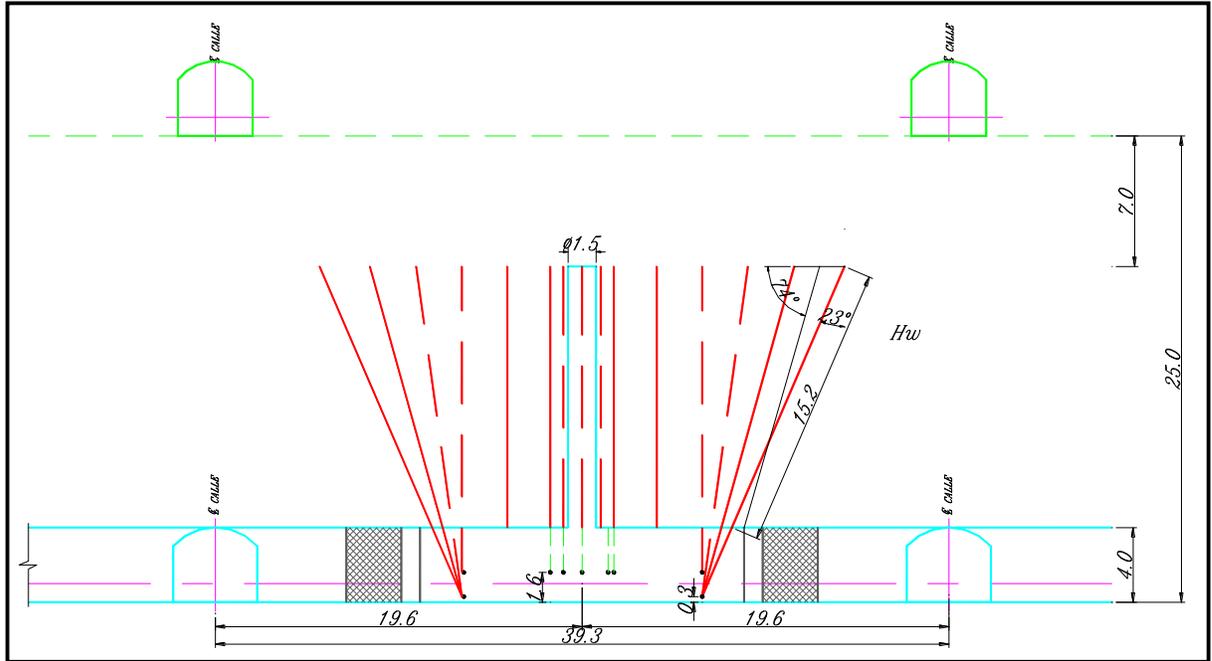


Ilustración 65 Perfil longitudinal del diagrama de disparo de la batea

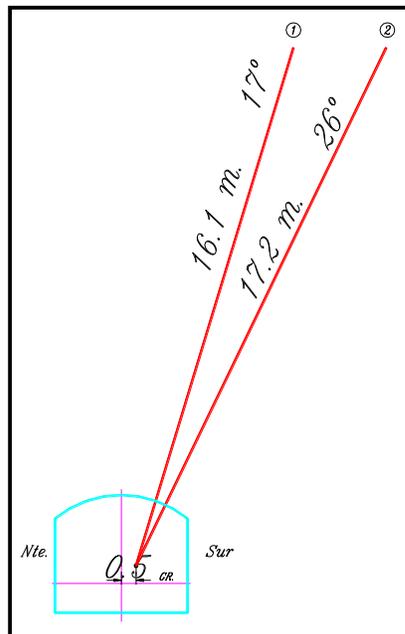


Ilustración 66 Perfil transversal del diagrama de disparo de la batea

Tabla 11 Dimensiones del diseño PCC

Principales Dimensiones del Diseño	
Altura Crown Pillar	25 [m]
Área Crown Pillar	325 [m ²]
Volumen Batea	3017 [m ³]
Altura Zanja	18 [m]
Puente	7 [m]
Ángulo Esc. Zanja	80°
Ángulo Basculamiento	23°
Longitud Tiro más largo	17.2 [m]
Ángulo Negativo	38°
Longitud Ángulo Negativo	10.2 [m]

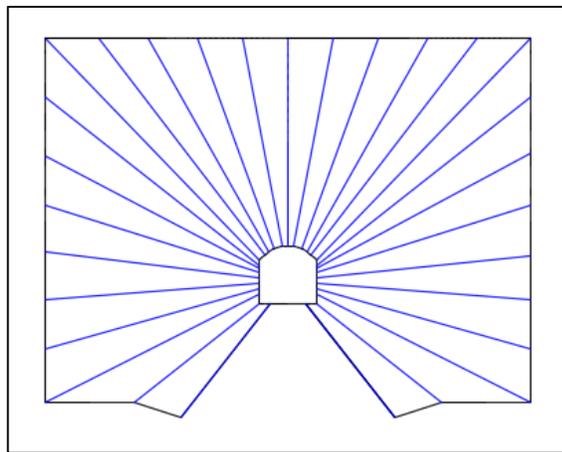


Ilustración 67 Diagrama de disparo hundimiento PCC

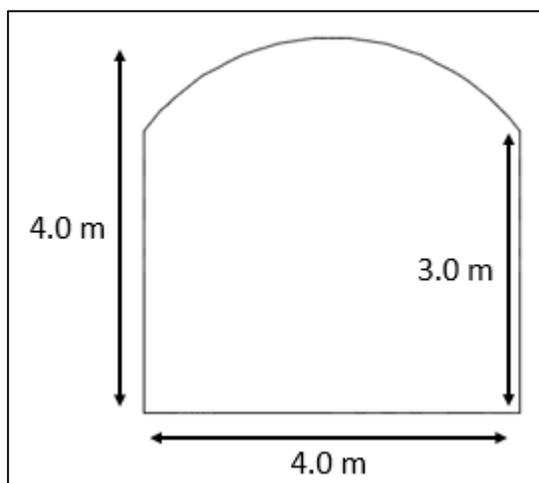


Ilustración 68 Galería de hundimiento PCC

10. ANEXO B – EQUIPOS UTILIZADOS

10.1. LHD

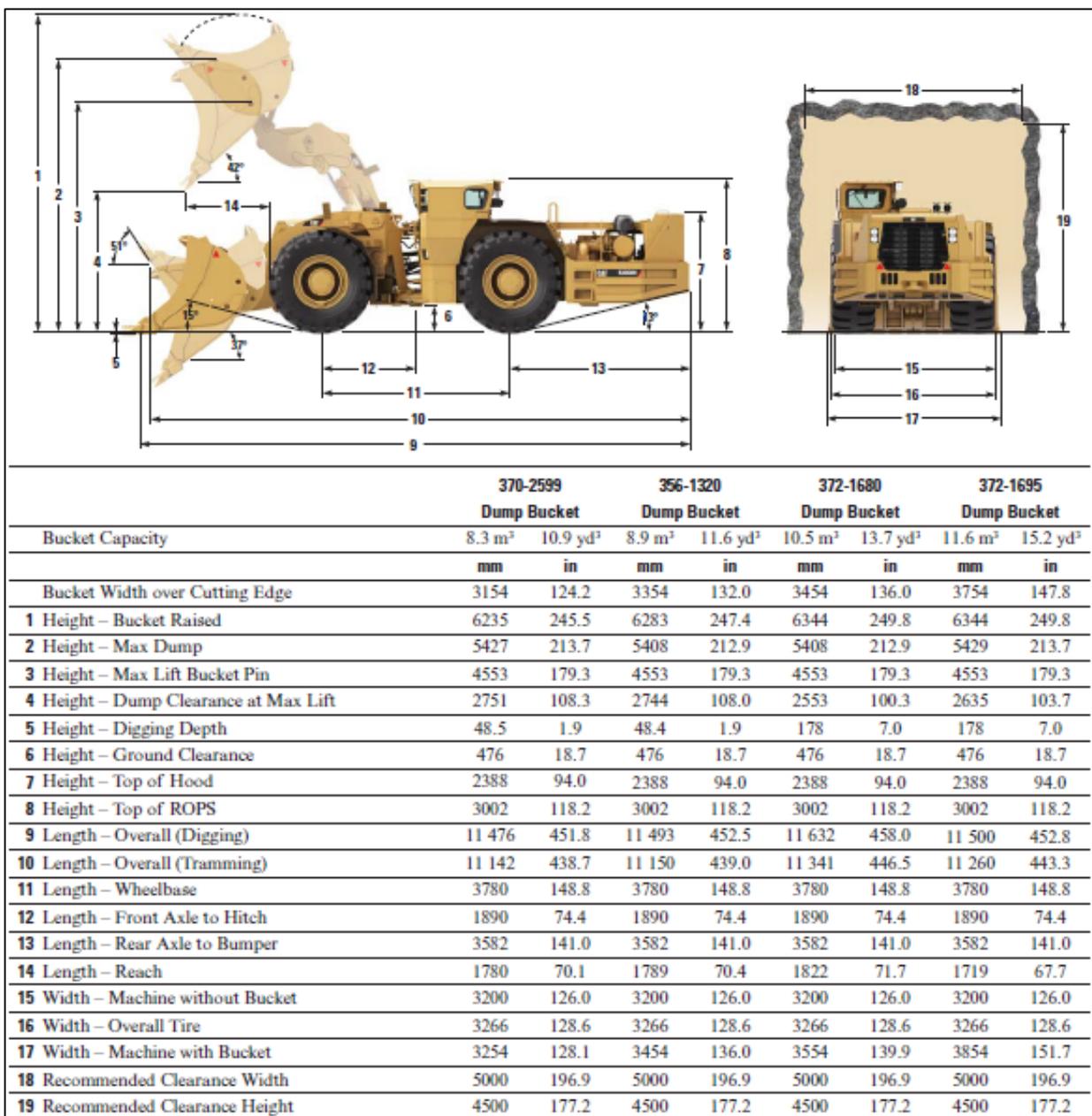


Ilustración 69 Dimensiones LHD utilizado

Turning Dimensions		
Outside Clearance Radius**	7536 mm	296.7 in
Inner Clearance Radius**	3247 mm	127.8 in
Axle Oscillation	8°	
Articulation Angle	42.5°	

**Clearance dimensions are for reference only.

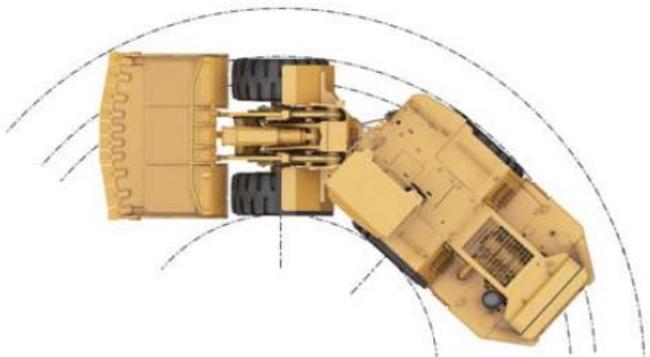


Ilustración 70 Radio de giro LHD

10.2. Simba

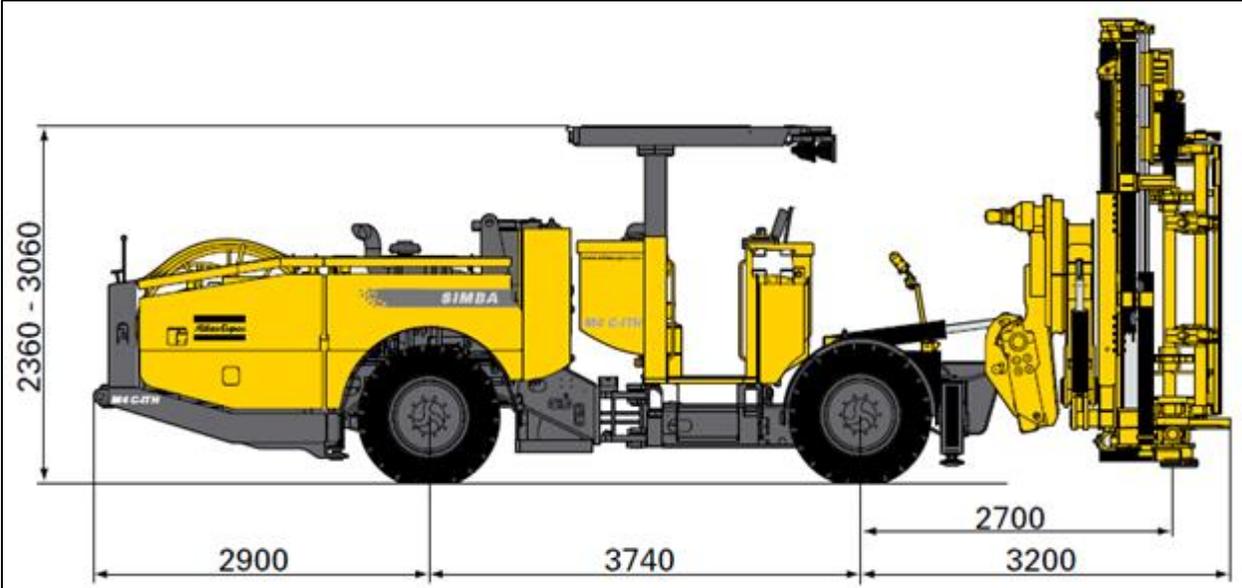


Ilustración 71 Dimensiones Simba

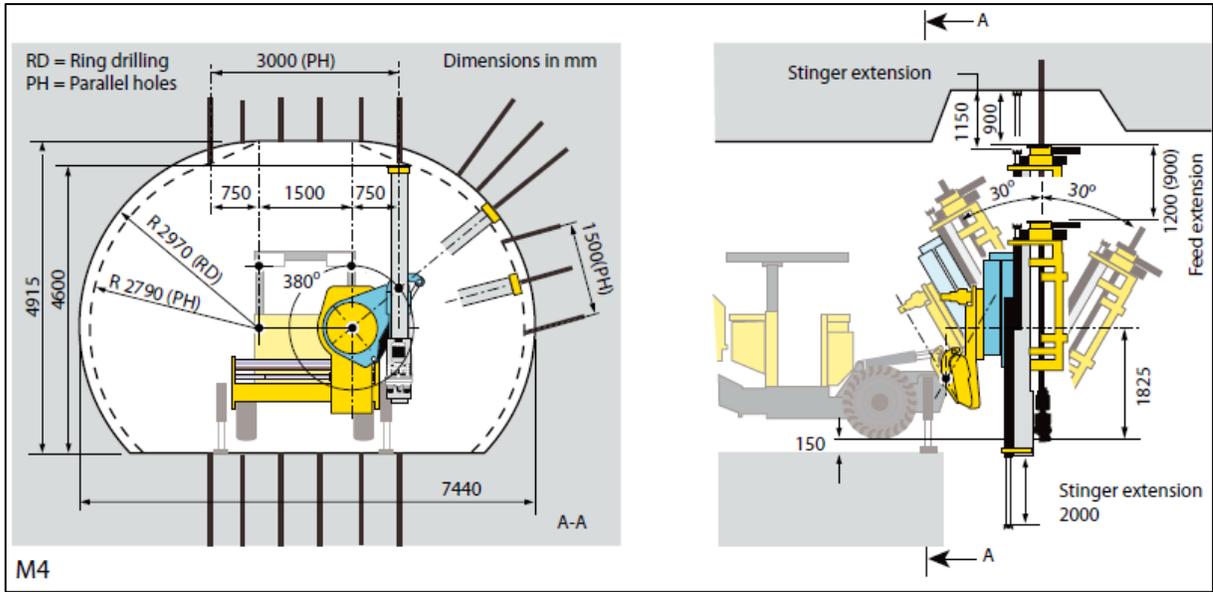


Ilustración 72 Posicionamiento Simba