



Organiza



Colegio de ingenieros
del Perú

DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles



**Geomecánica Aplicada
al Minado Subterráneo**

24 y 25, Julio 2020





Contenido

01

Recopilación de data
geomecánica

02

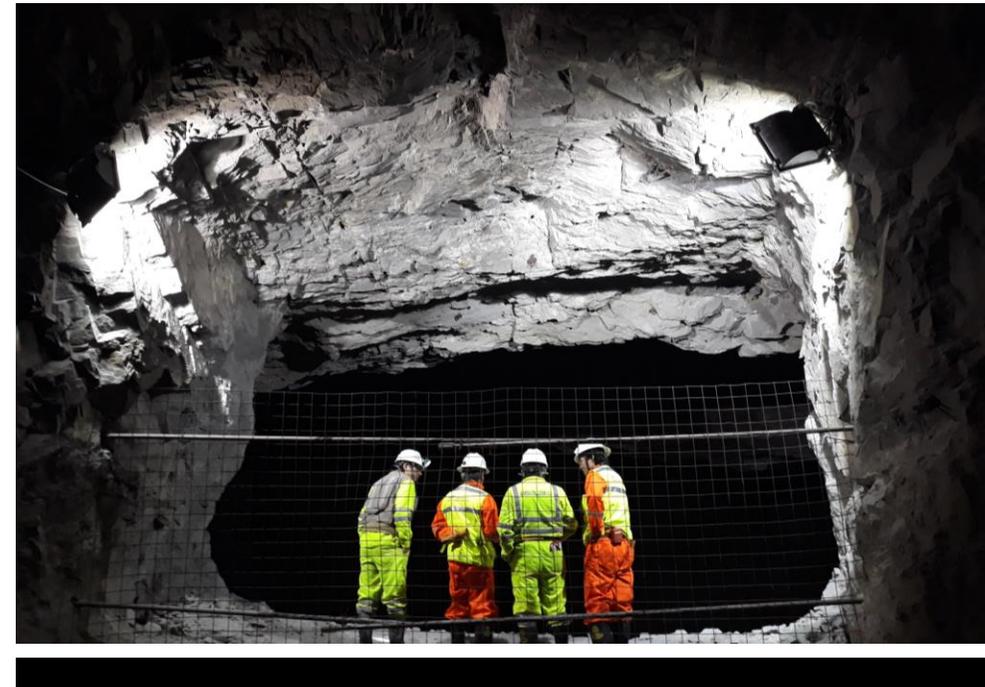
Manejo de datos
geomecánico

03

Aspectos importantes para el
modelamiento numérico

04

Geomecánica de los métodos
de minado (casos prácticos)



04 Geomecánica de los métodos de minado (casos prácticos)

4a

Criterios geomecánicos para la selección del método de minado

4b

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido por pilares

4c

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido artificialmente

4d

Geomecánica en Métodos por Hundimiento



DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

Contenido



MSc. Néstor David Córdova Rojas

04 Geomecánica de los métodos de minado (casos prácticos)

4a

Criterios geomecánicos para la selección del método de minado

4b

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido por pilares

4c

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido artificialmente

4d

Geomecánica en Métodos por Hundimiento



DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

Contenido



Objetivos de la geomecánica en el minado

- Asegurar la estabilidad global de la estructura de la mina.
- Proteger las principales aberturas de servicio a través de su vida de diseño.
- Proveer accesos seguros a los lugares de trabajo en y alrededor de los centros de producción de mineral.
- Preservar en condición de minables las reservas de mineral no minadas.

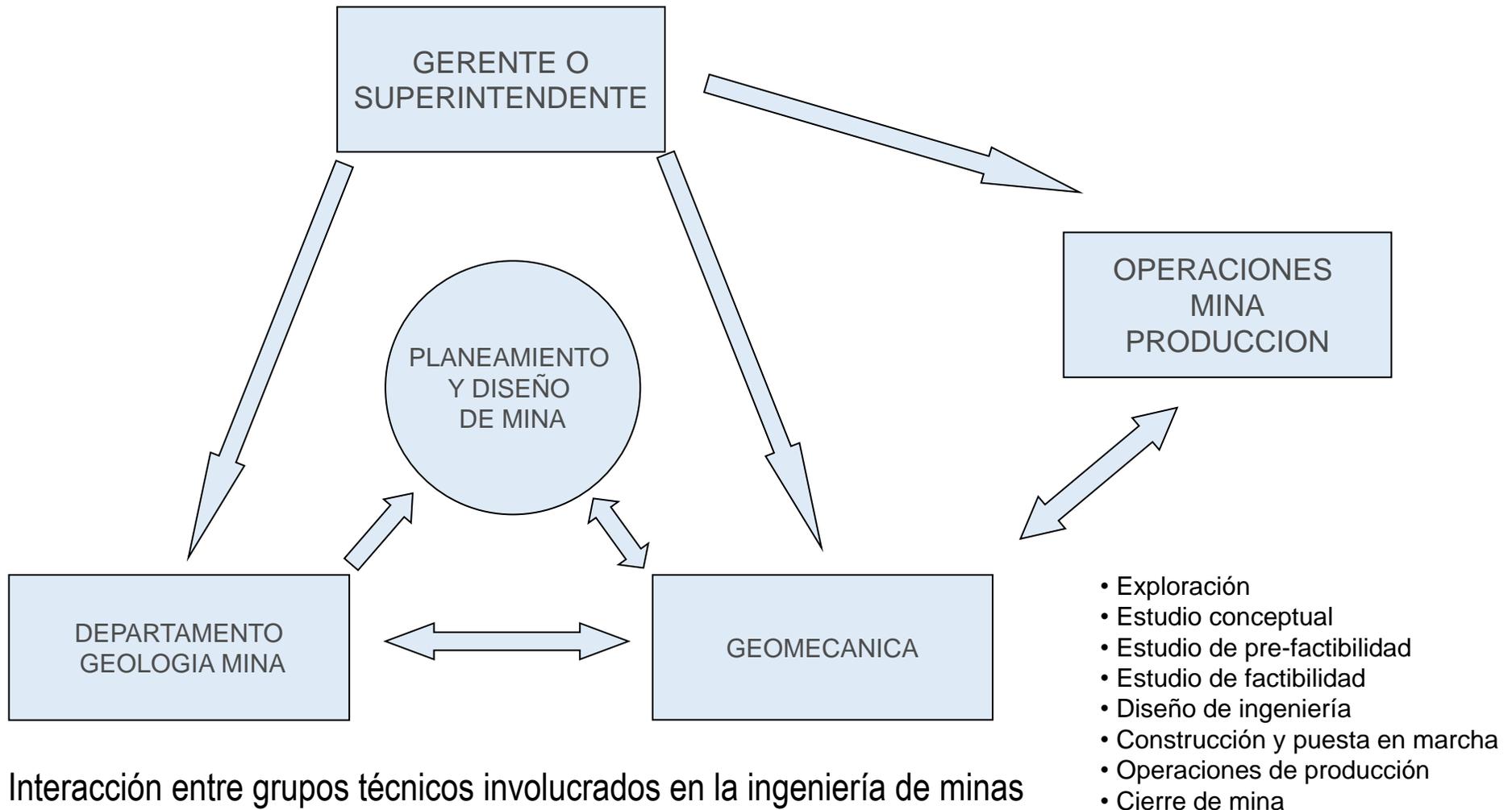
! EL PROBLEMA TIPICO DEL PLANEAMIENTO Y DISEÑO ES DETERMINAR LA SECUENCIA DE EXPLOTACION DEL YACIMIENTO SATISFACIENDO ESTOS OBJETIVOS SIMULTANEAMENTE!

! LA REALIZACION DE ESTOS OBJETIVOS REQUIERE DEL CONOCIMIENTO DE LAS CONDICIONES GEOMECAICAS DEL YACIMIENTO Y DE LA CAPACIDAD PARA ANALIZAR LAS CONSECUENCIAS MECANICAS DE LAS DIFERENTES OPCIONES DE MINADO!

Técnicas de control de la estabilidad

- A fin de contrarrestar el peligro de la inestabilidad de la masa rocosa es necesario adoptar medidas de control de la estabilidad de las labores mineras.
- Se puede lograr mejores condiciones de estabilidad de las excavaciones:
 - Planeando adecuadamente el minado del cuerpo mineralizado
 - Considerando adecuadas formas, tamaños y orientaciones de las excavaciones
 - Considerando adecuados esquemas y secuencias de avance del minado
 - Implementando técnicas apropiadas de voladura
 - Asegurando correctas prácticas de desatado
 - Utilizando el sostenimiento con estructuras naturales y/o artificiales
 - Implementando controles instrumentales de la estabilidad

Organización del trabajo geomecánico en el minado subterráneo

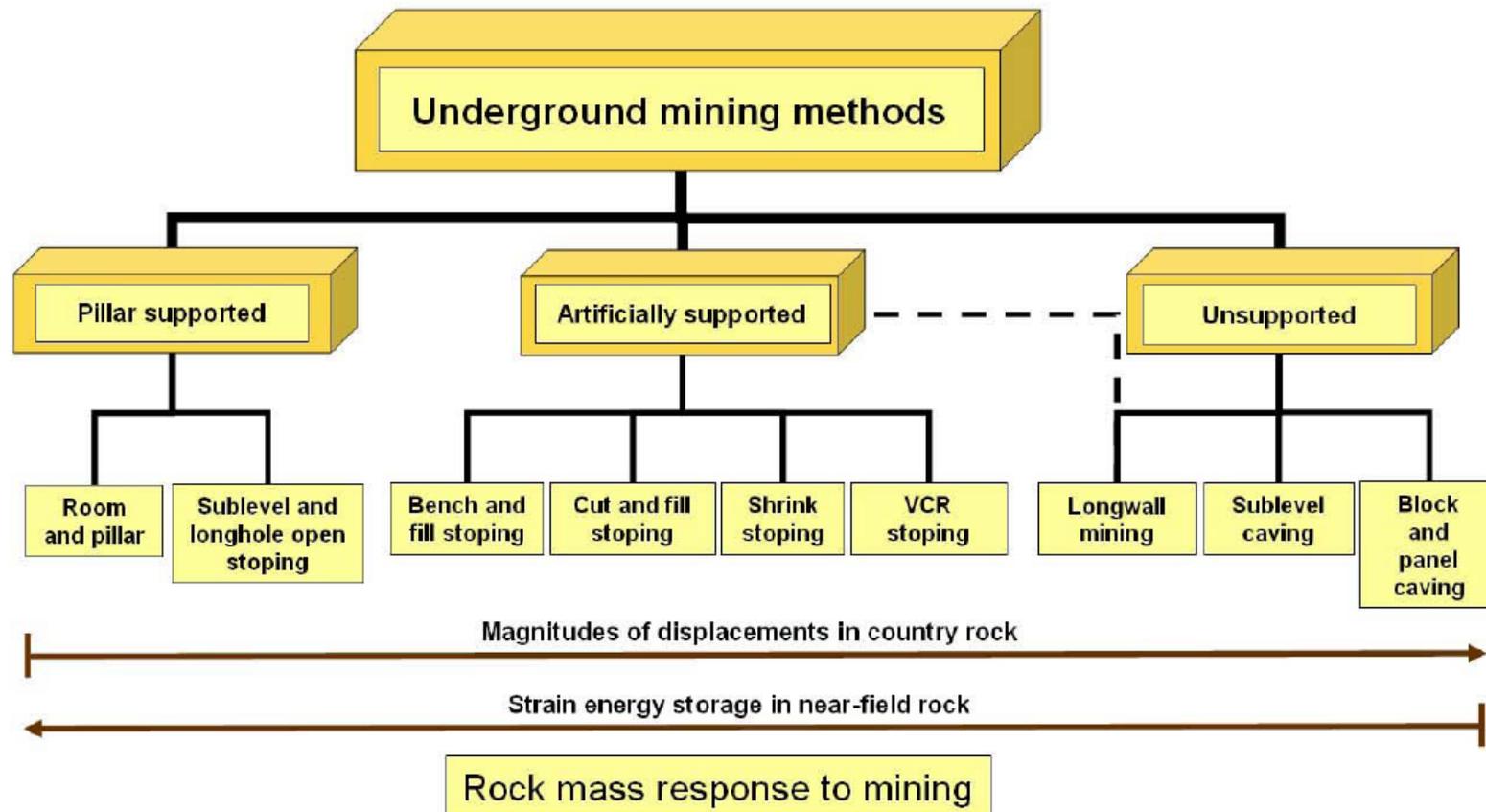


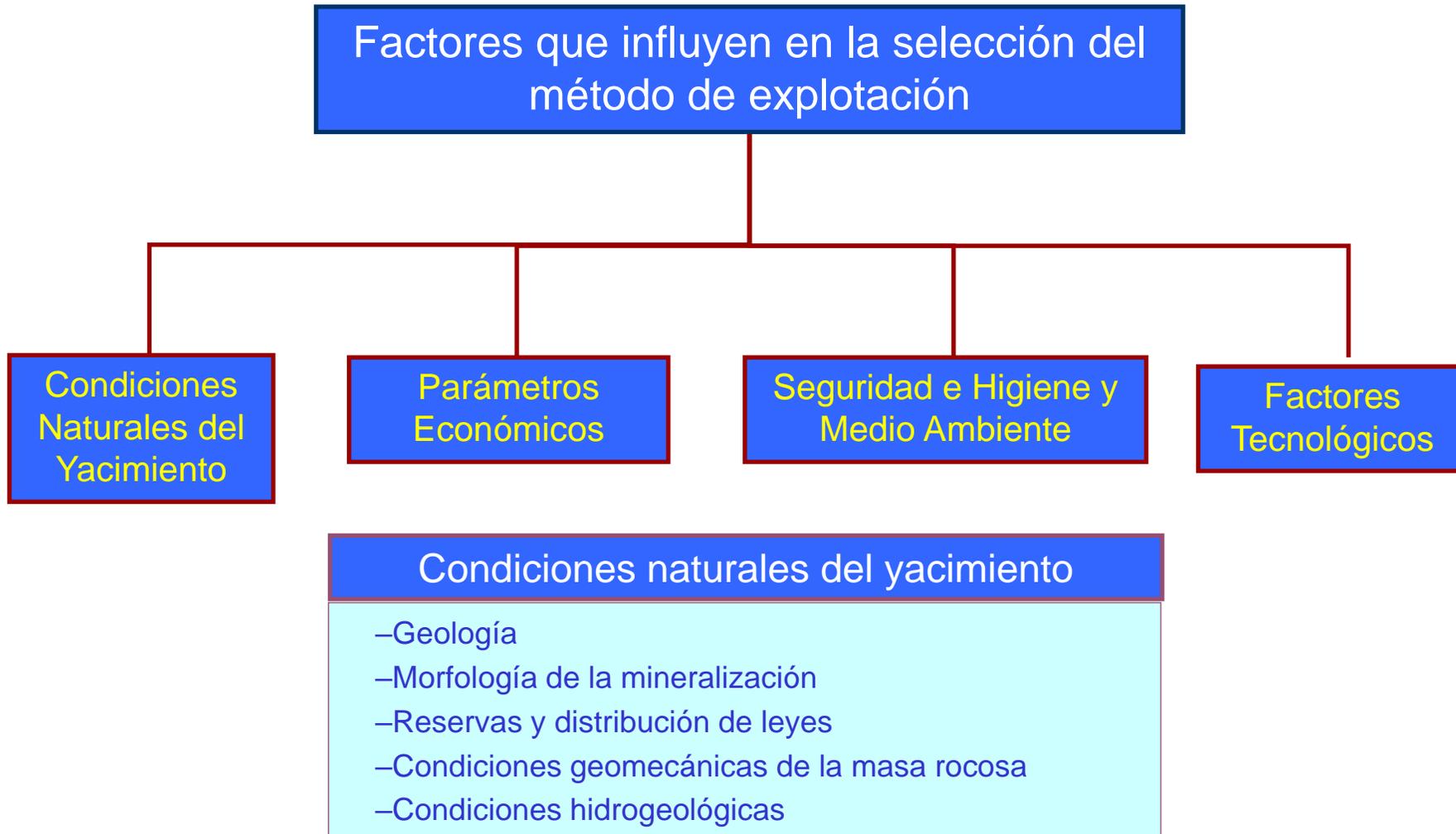
Interacción entre grupos técnicos involucrados en la ingeniería de minas

Funciones del grupo de geomecánica (En interacción con Planeamiento y Diseño Mina)

- **Diseño de aberturas mineras permanentes**
- **Diseño de esquemas y secuencias del avance del minado** (En función de la evolución de la estructura de la mina, para un programa de minado operacionalmente aceptable)
- **Diseño de los sistemas de extracción** (Detalles de la configuración del tajeo y la recuperación del mineral del tajeo)
- **Apoyo a la operación minera**

Métodos de minado subterráneos





Selección del método de minado



Parámetros económicos

- Tasas de producción (t/h)
- Vida de la mina
- Productividad (t/hombre-hora)
- Costos de explotación de otros métodos posibles
- Costos de capital de otros métodos posibles

Seguridad y Medio Ambiente

- Facilidad para disponer de áreas de disposición de materiales
- Condiciones de seguridad de otros métodos posibles
- Subsistencia, o efectos que afectan a la superficie

Factores tecnológicos

- Recuperación
- Rendimientos mineros y mineralúrgicos
- Dilución
- Flexibilidad del método a condiciones cambiantes
- Selectividad del método
- Concentración o dispersión de los trabajos
- Facilidad para mecanizar y automatizar
- Intensidad de capital y mano de obra

Selección del método de minado



Métodos de minado subterráneos en orden de costos

Orden	Método de minado	Abreviación
1	Block ó Panel Caving	BC
2	Room and Pillar	R&P
3	Sub Level Stoping	SLS
4	Sub Level Caving	SLC
5	Cut and Fill Stoping	C&F
6	Vertical Crater Retreat	VCR
7	Shrinkage Stoping	SHS
8	Square Set Stoping	SQS

04 Geomecánica de los métodos de minado (casos prácticos)

4a

Criterios geomecánicos para la selección del método de minado

4b

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido por pilares

4c

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido artificialmente

4d

Geomecánica en Métodos por Hundimiento



DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

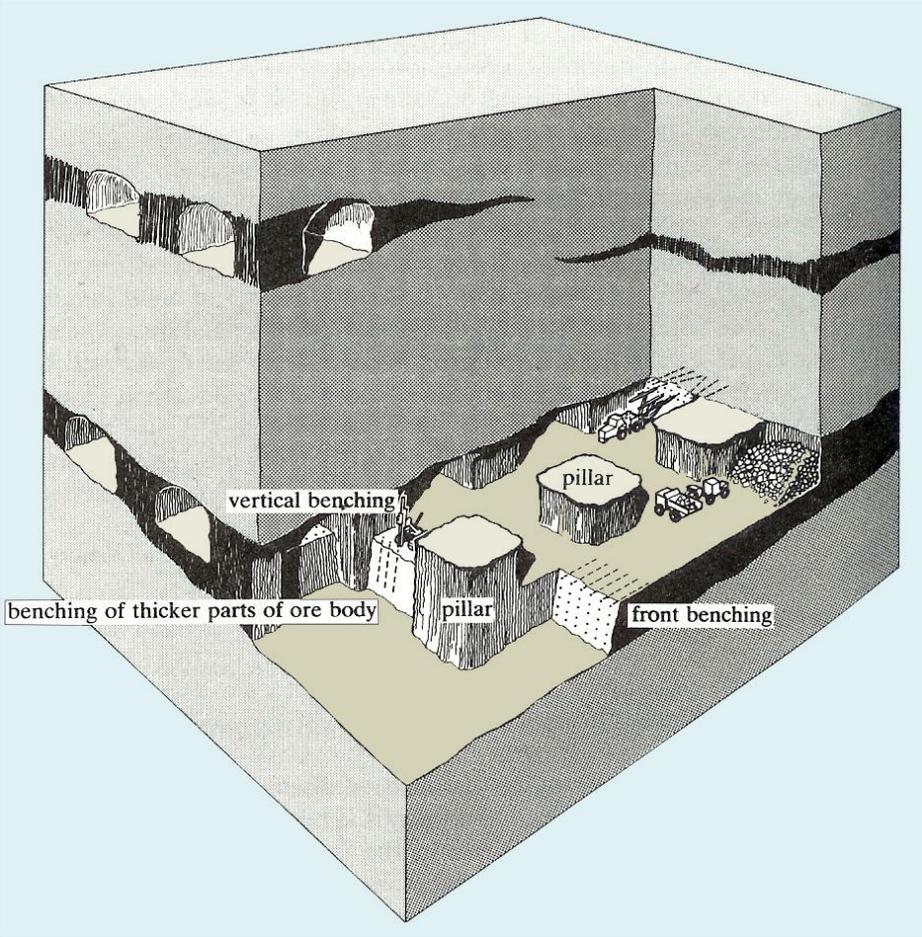
Contenido



Métodos sostenidos con pilares



Métodos de minado por cámaras y pilares



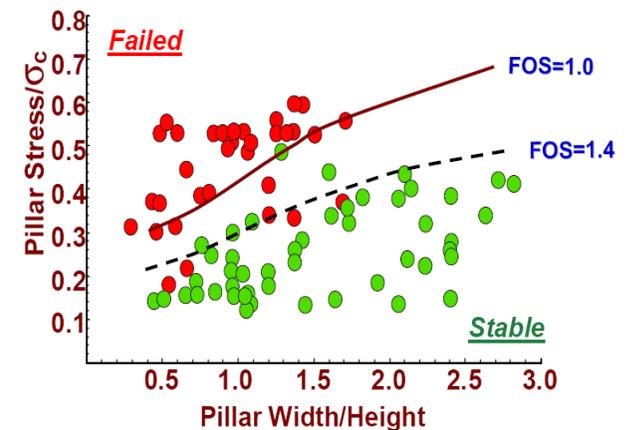
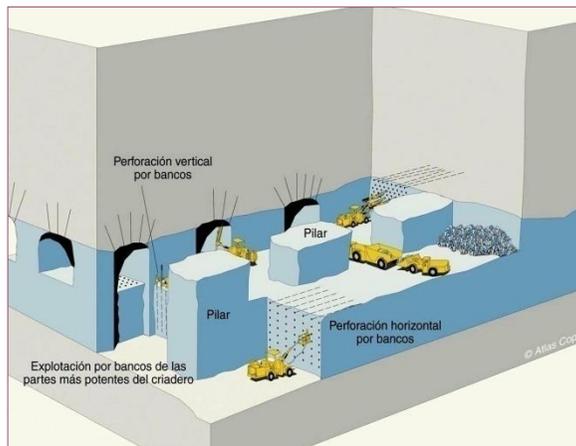
Mina Chapi – Moquegua Perú

Métodos sostenidos con pilares



Aspectos geomecánicos del método de minado por cámaras y pilares

- Métodos de minado con soporte de pilares.
- Mecánica básica del comportamiento de pilares.
- Análisis de esquemas de cámaras y pilares:
 - Aproximación según área tributaria.
 - Estimación de la resistencia de los pilares.
 - Cálculo del factor de seguridad.
- Diseño de esquemas de tajeos y pilares en roca de yacimiento estratiforme.



Diseño de cámaras y pilares utilizando modelamiento numérico

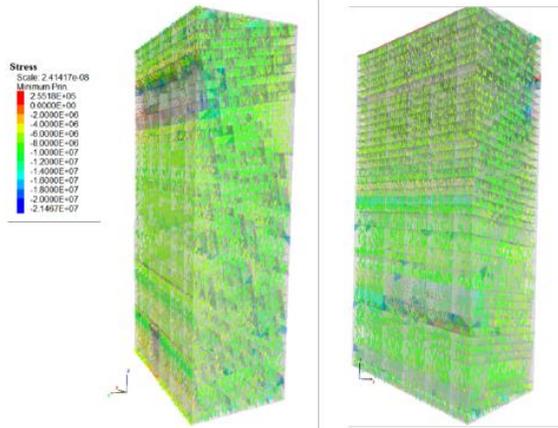


Fig 12. Distribuciones de tensiones en el pilar de roca GSI = 50, Previo a la falla.

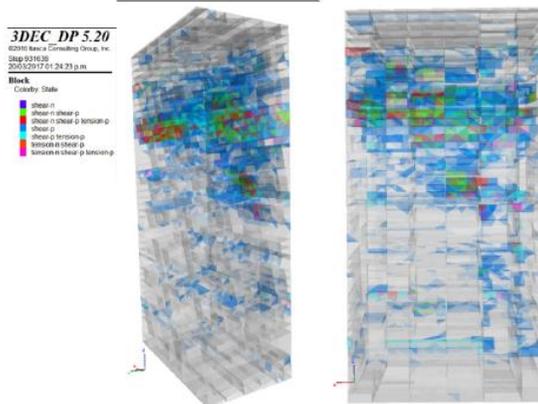
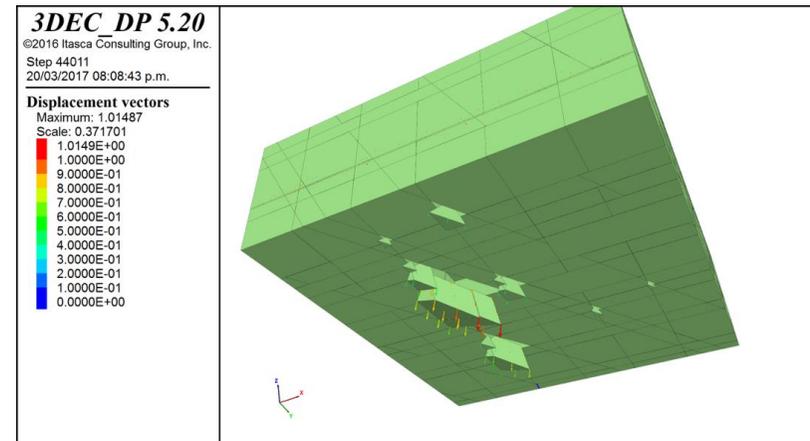
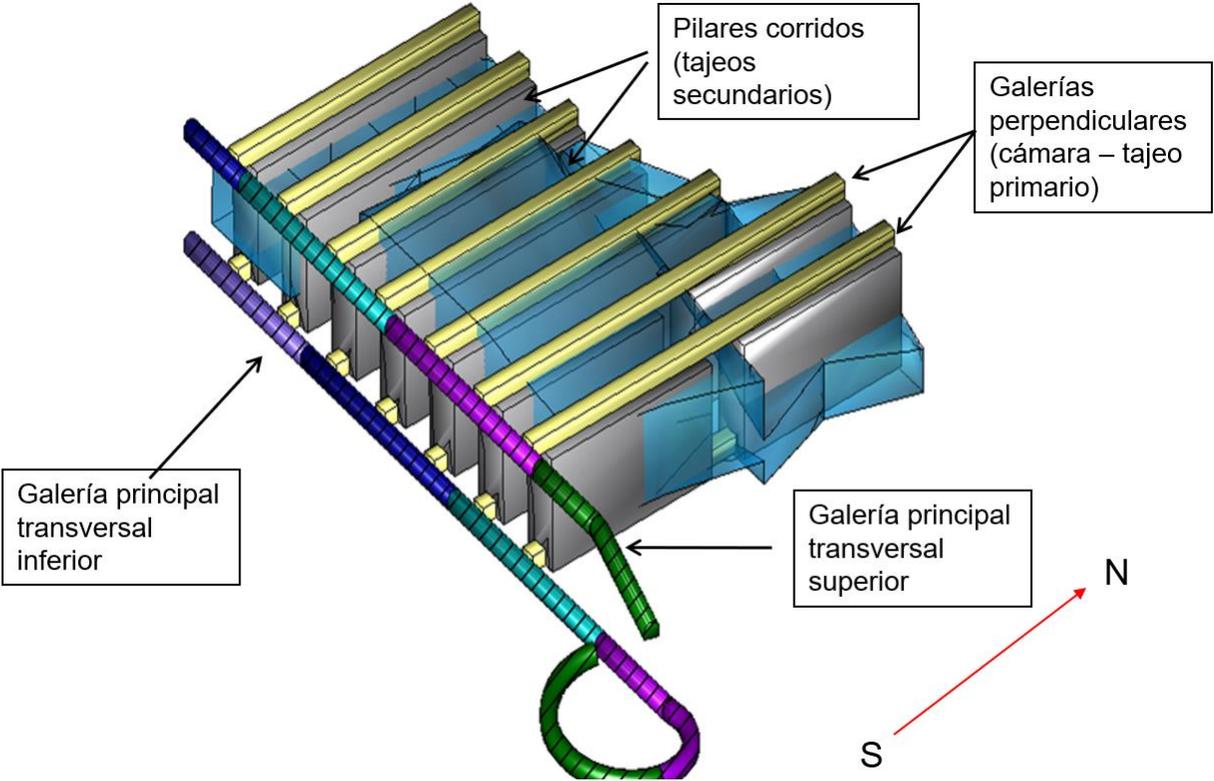


Fig 13. Pilar Fracturado (elementos azules significan elementos cizallados en el presente).



Método de minado cámaras y pilares corridos



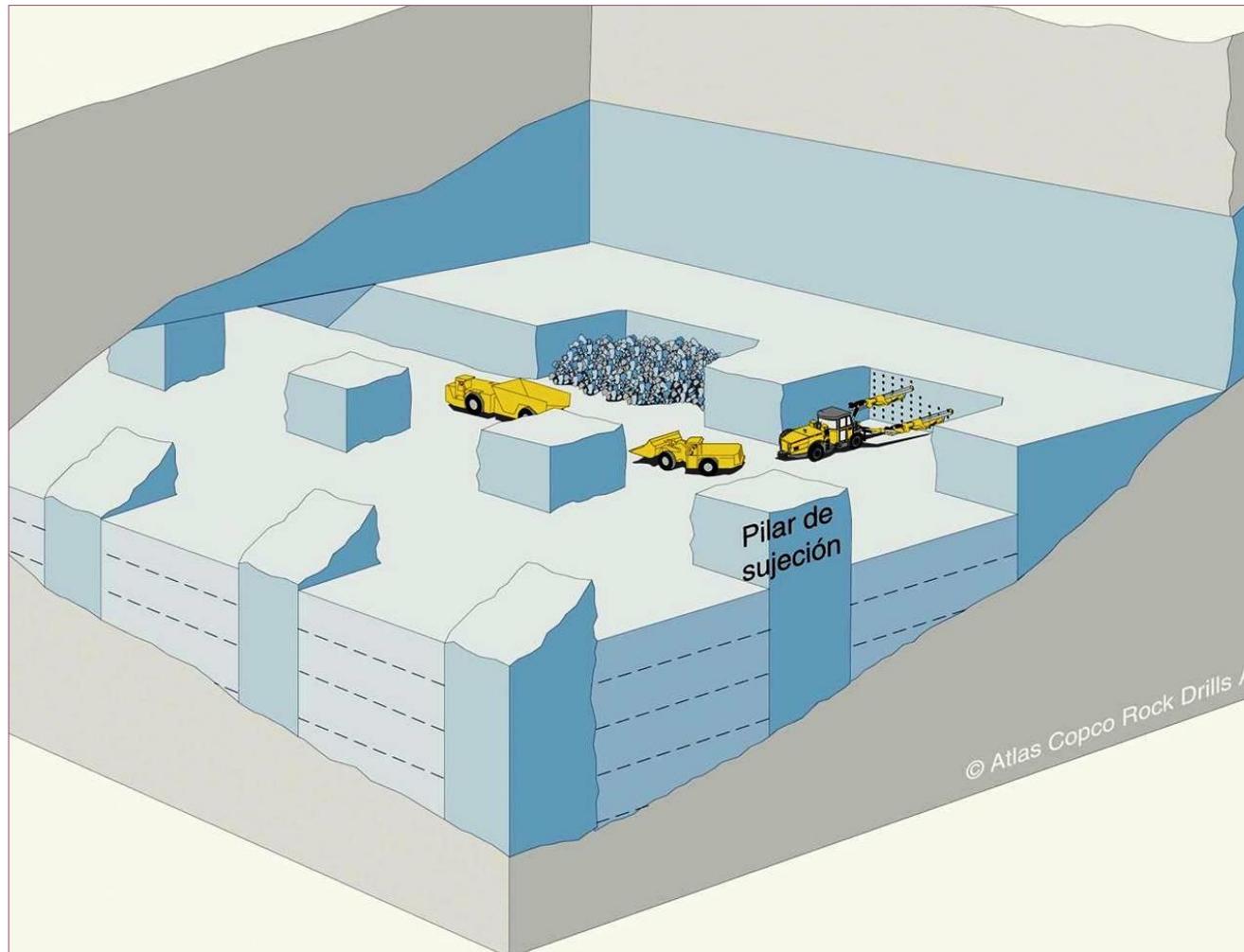
Mina Marcapunta Norte

Métodos sostenidos con pilares



DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

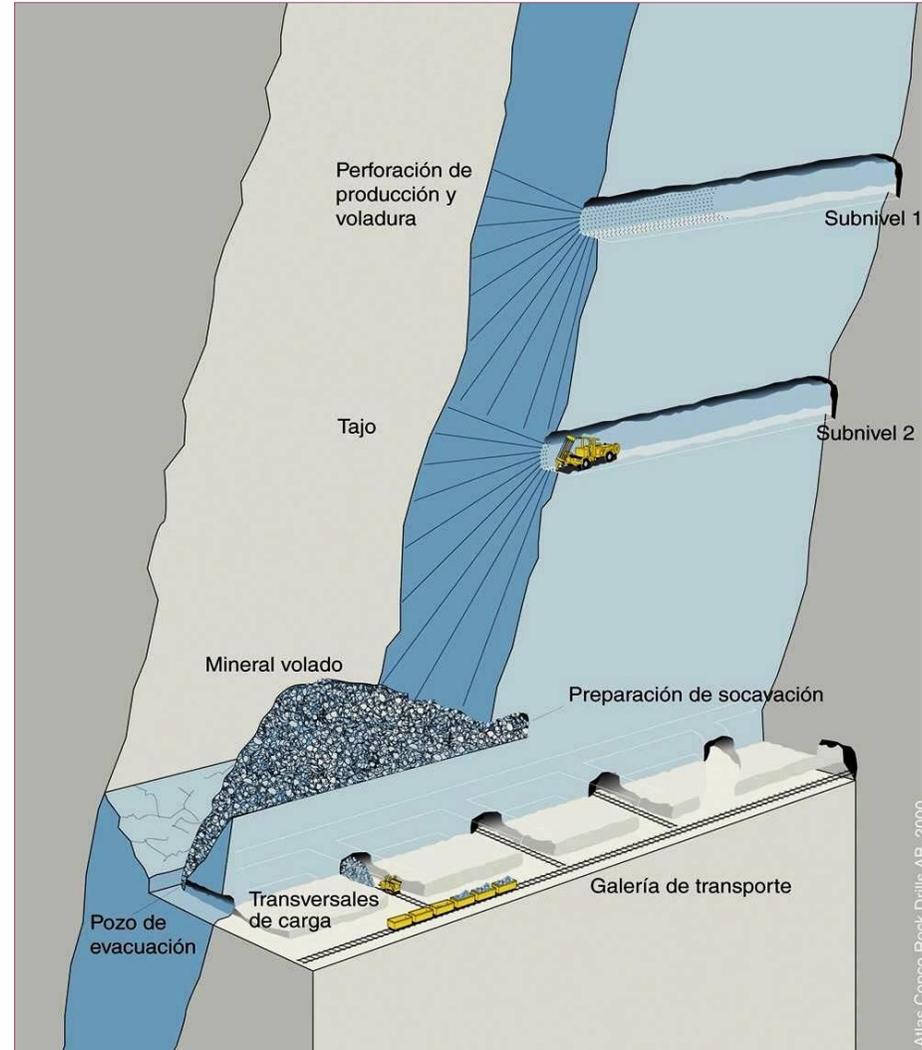
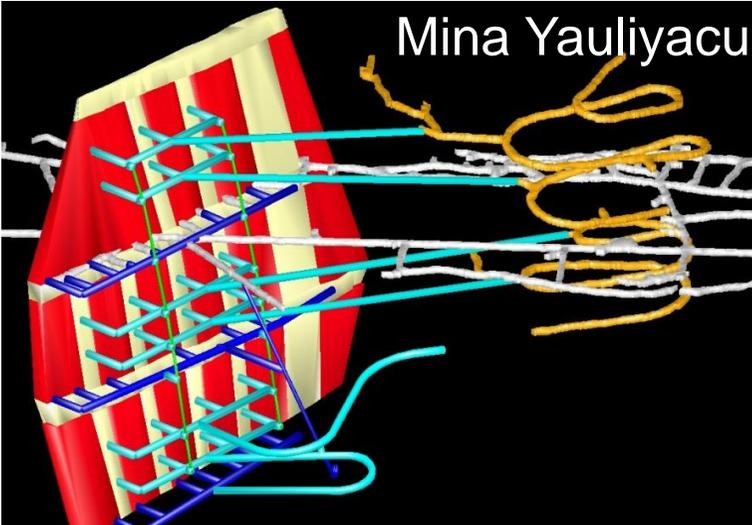
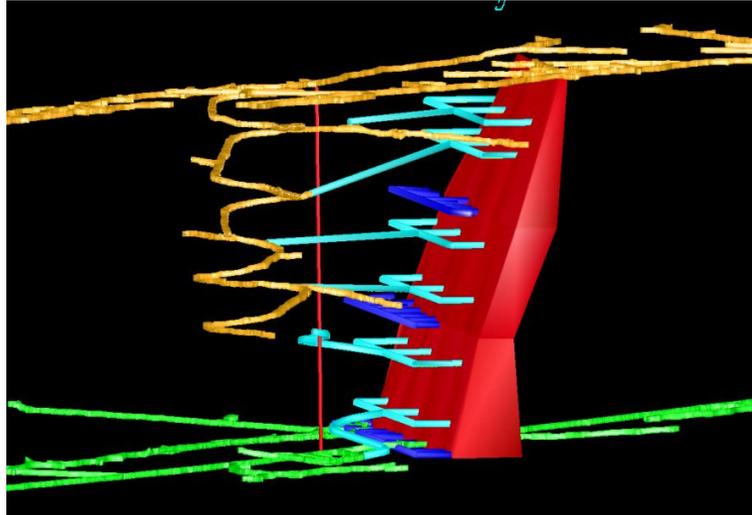
Esquema del método de minado Post Room & Pillar Mining



Métodos sostenidos con pilares



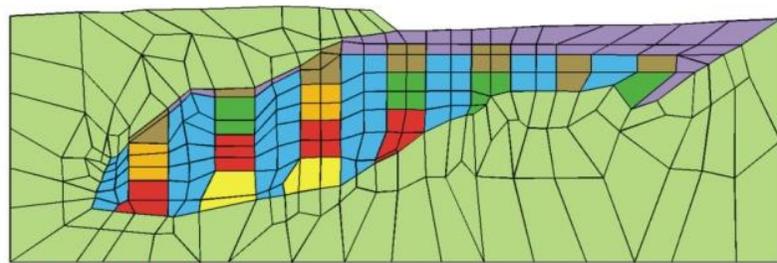
Método de minado tajeos por subniveles – Sublevel Stopping (SLS)



Métodos sostenidos con pilares

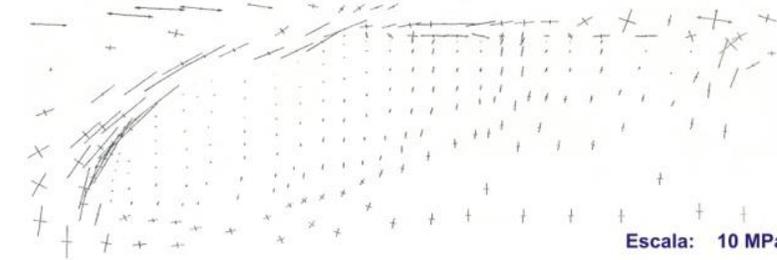


Método de minado SLS en cuerpos mineralizados



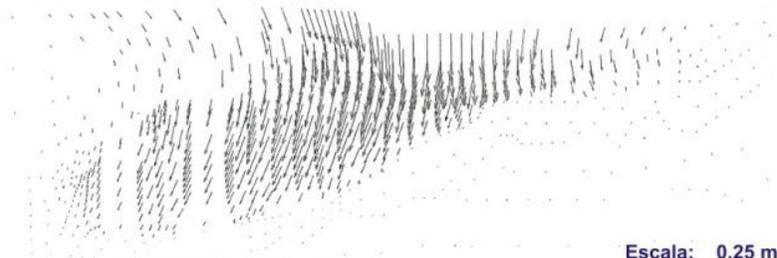
Escala: 20 m

MINA JUANITA PERUBAR S.A.
a.- Malla de elementos finitos utilizado.



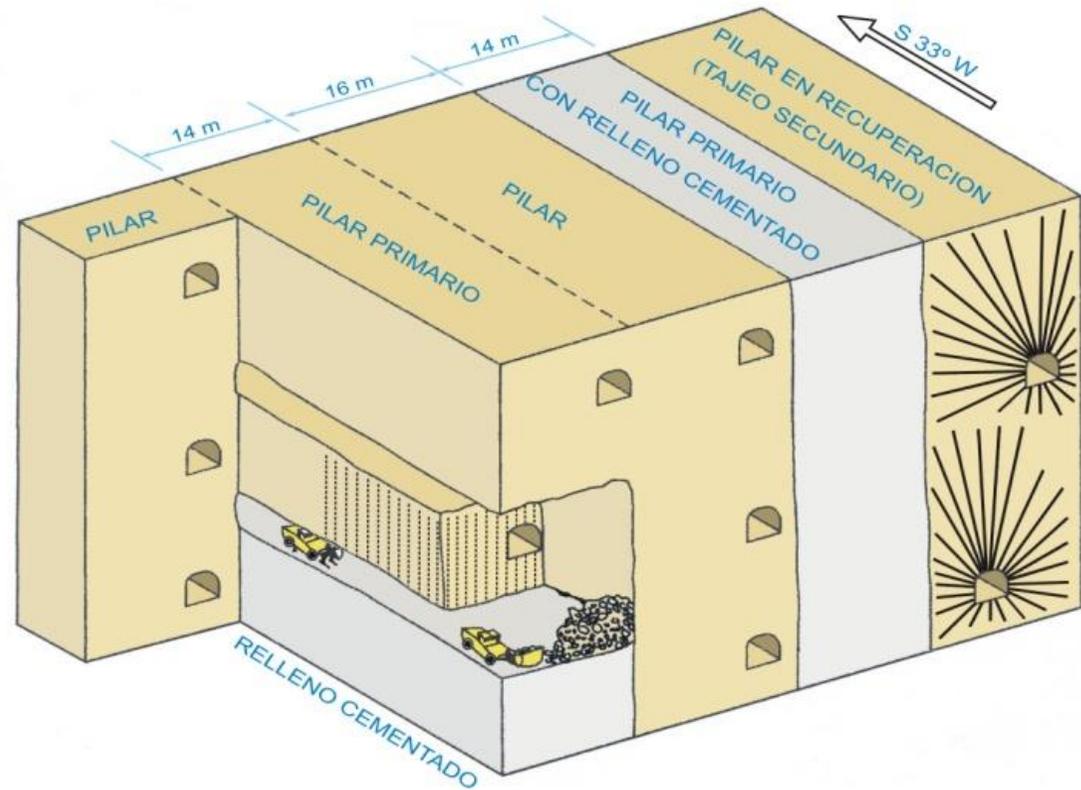
Escala: 10 MPa

b.- Distribución de esfuerzos principales.



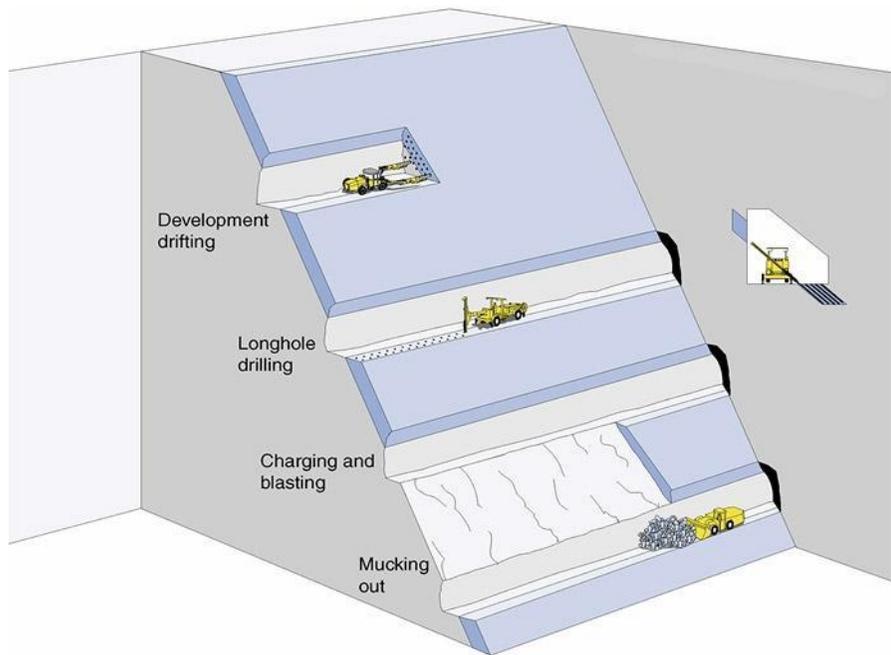
Escala: 0.25 m

c.- Distribución de deformaciones.



Mina Juanita

Método de minado SLS en vetas angostas



Mina Arcata



Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

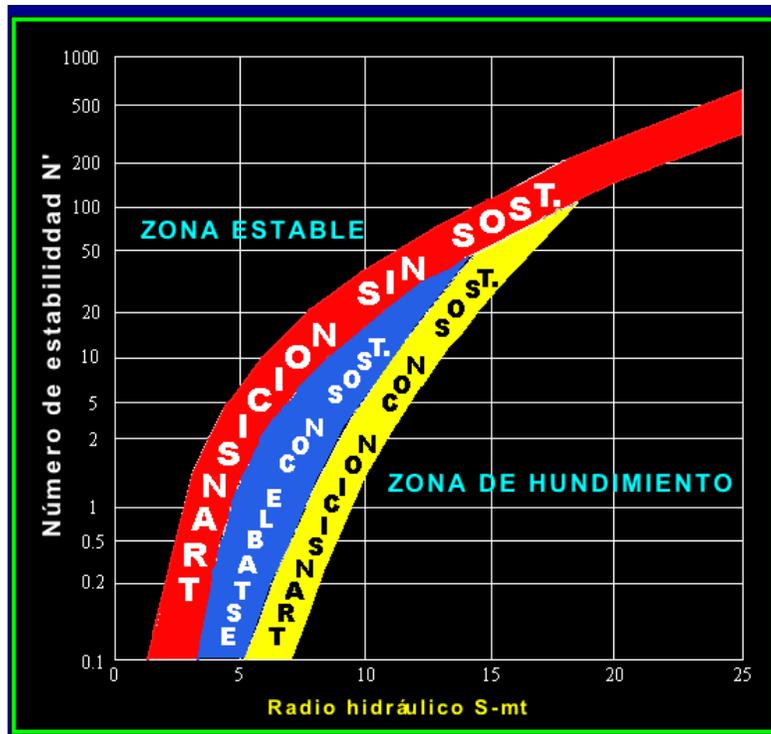
- Método de minado por tajeos abiertos.
- Dimensionamiento de tajeos abiertos.
- Reforzamiento de tajeos abiertos.
- Relleno en tajeos abiertos.
- Secuencia de avance del minado.

Aspectos geomecánicos del método de minado tajeos abiertos

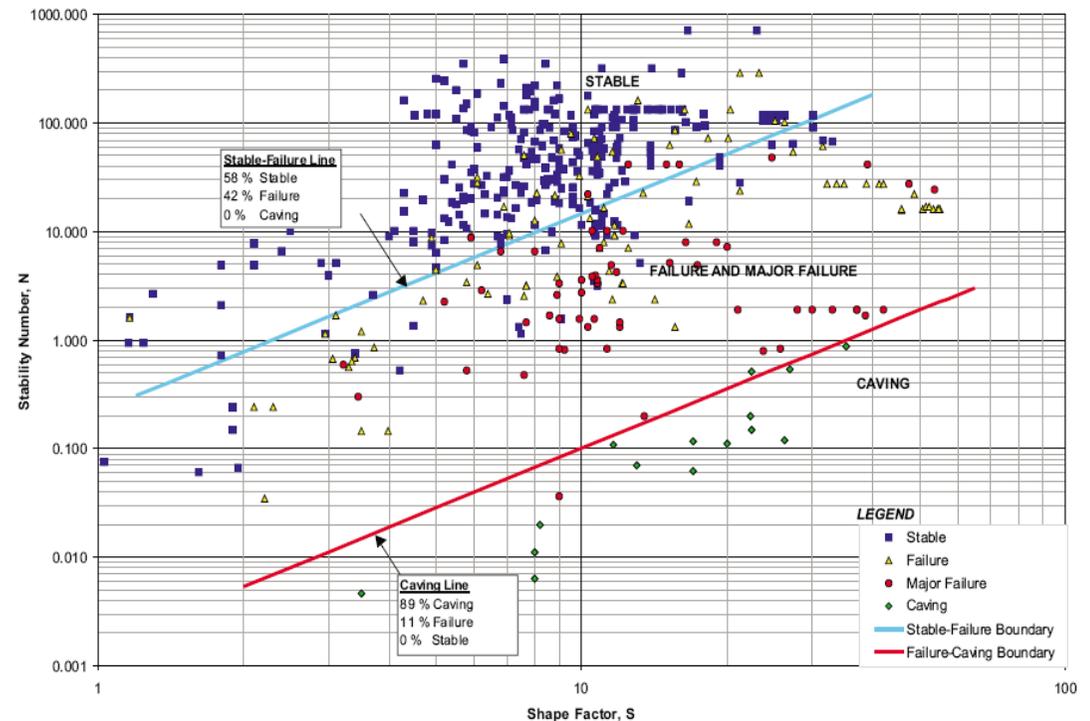
- Estabilidad sin sostenimiento de las paredes y corona de los tajeos abiertos durante el minado
- Control de deformaciones de la masa rocosa de las cajas.
- Estabilidad del pilar de corona.
- Precisión en la perforación de taladros largos.
- Relleno para la estabilidad de las paredes durante el minado de tajeos secundarios.
- Control de la dilución.
- Limitación de la ocurrencia y magnitud de estallidos de rocas y control de sus efectos.

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

Dimensionamiento de tajeos



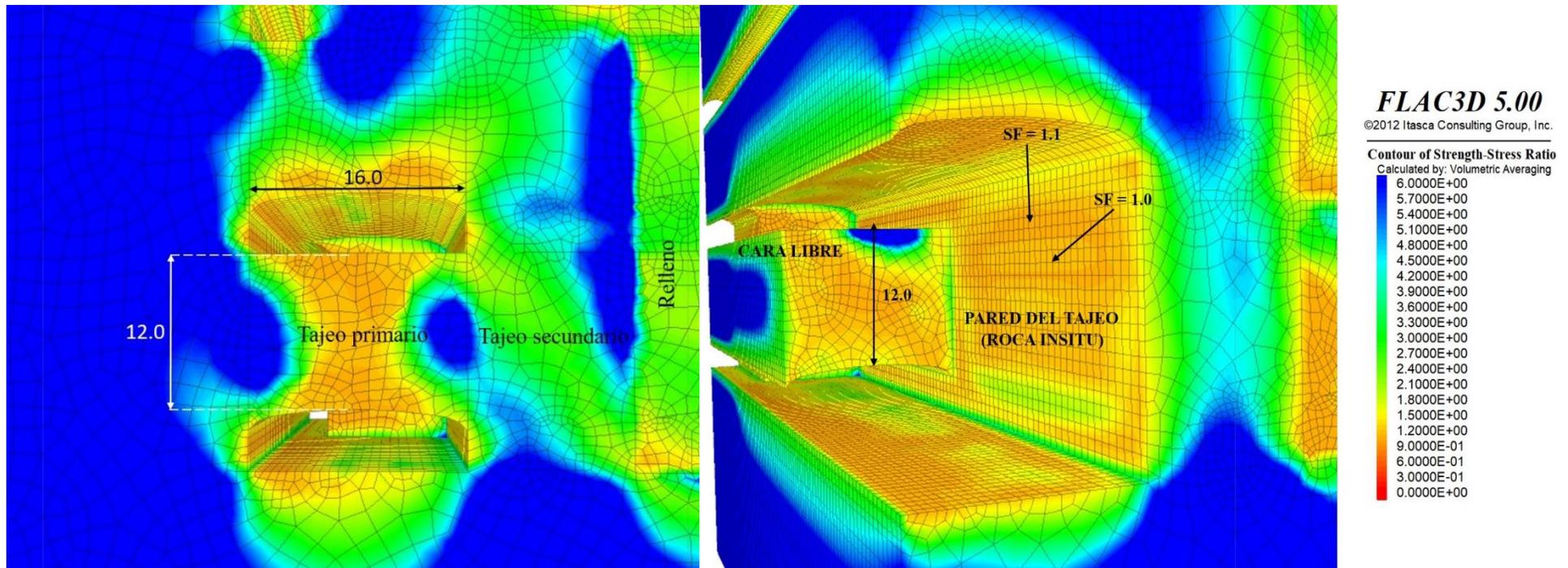
Potvin (1988), mod Nickson (1992)



Mawdesley (2002)

Método Gráfico de Estabilidad

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS Dimensionamiento de tajeos



Simulación numérica Esfuerzo/Deformación 3D

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

Reforzamiento

- La densidad del reforzamiento es bastante más baja comparada con aquella que se utiliza en excavaciones de ingeniería civil, sujetas a inestabilidad en la masa rocosa de sus bordes.
- Una distribución relativamente uniforme de reforzamiento escaso es inefectivo para controlar las paredes del tajeo.
- Cuando el reforzamiento es necesariamente escaso en promedio, la concentración del reforzamiento en zonas localizadas apropiadamente puede mejorar su potencial de control del terreno.

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

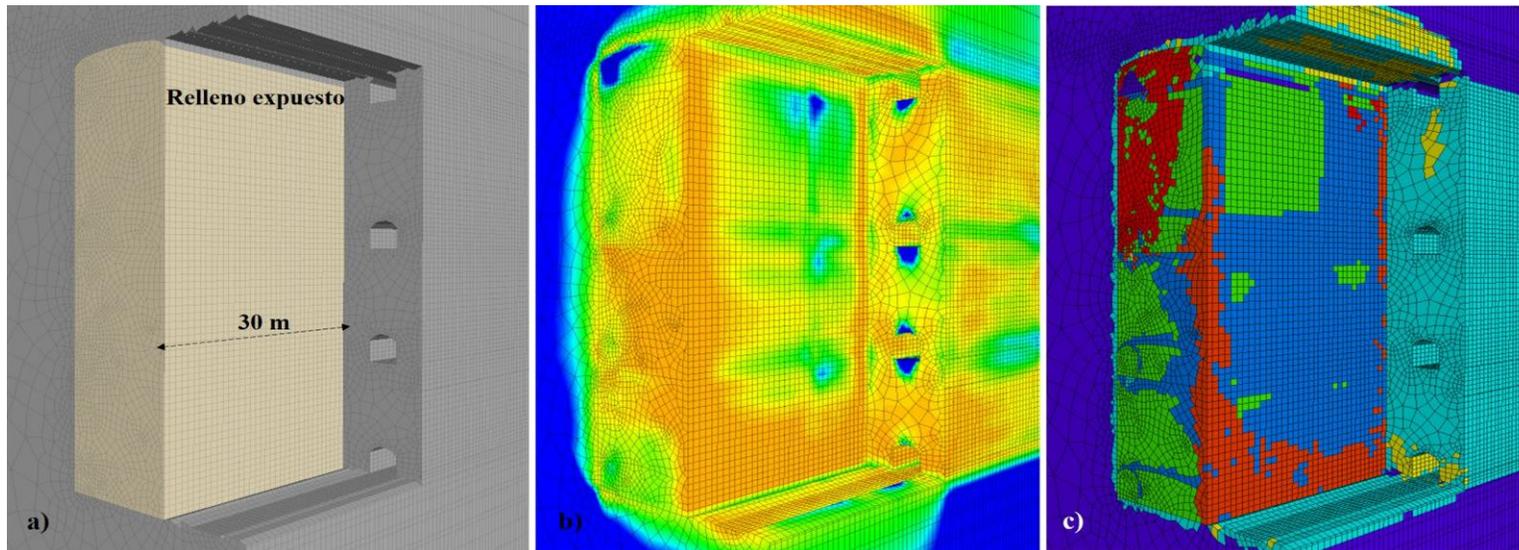
Relleno de tajeos abiertos

- Forma pilares artificiales para prevenir la generación de tajeos inestables.
- Controla los desplazamientos de la roca en la periferia del cuerpo mineralizado y en la roca de las cajas.
- Ayuda a minimizar la dilución.
- Forma paredes estables sin sostenimiento durante el minado de tajeos secundarios.
- Mantiene la integridad y estabilidad bajo cargas verticales impuestas por la redistribución de esfuerzos debido al minado.
- Evita la licuación bajo cargas dinámicas.
- Resiste la atricción durante el jalado del mineral de los tajeos secundarios.

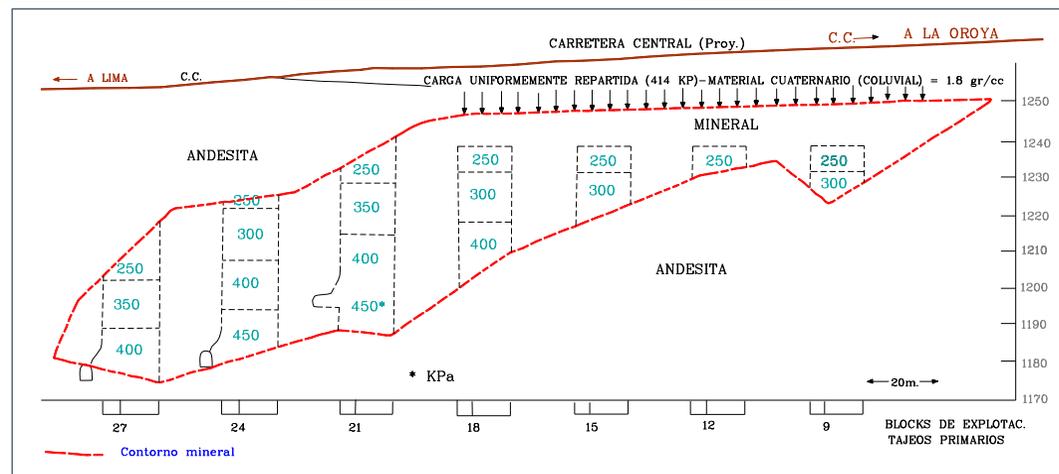
Métodos sostenidos con pilares



Aspectos geomecánicos del método de minado SLS



Relleno de tajeos abiertos



Mina Juanita

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

Tipos de relleno

- Relleno hidráulico cementado (CHF).
- Relleno con agregados cementados (CAF).
- Relleno rocoso cementado (CRF).
- Mezclas de relleno rocoso y relleno hidráulico cementado
- Relleno en pasta (PF).
- Mezclas de relleno en pasta y relleno rocoso.
- Relleno con desmonte rocoso en tajeos secundarios

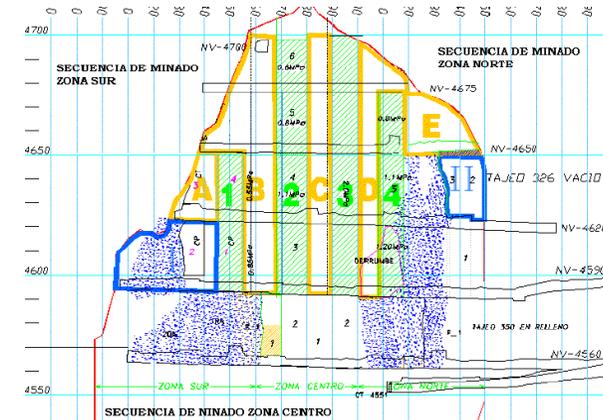
Métodos sostenidos con pilares



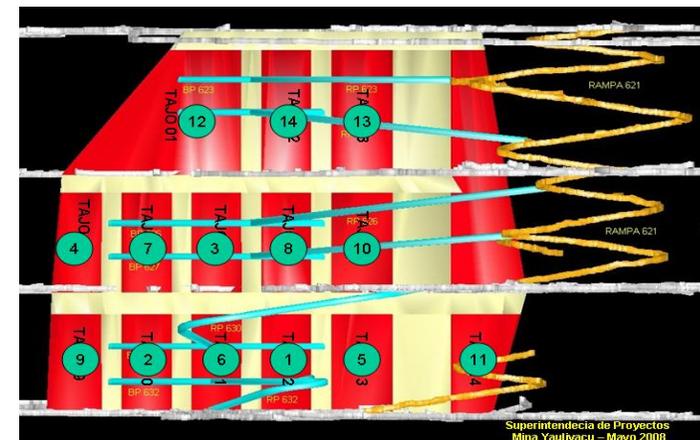
Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

Secuencia de avance del minado

- Maximizar la recuperación del mineral.
- Extracción temprana de bloques que tienen soporte natural.
- Lograr tasas de extracción uniformes espacialmente.
- Ordenar la retirada del minado hacia áreas sólidas y estables.
- Evitar dejar pilares remanentes dispersos.
- Minimizar áreas de altos esfuerzos inducidos.
- Controlar la estabilidad global de la mina y la sismicidad.
- Proteger las principales instalaciones de la mina.
- Limitar la cantidad de trabajo realizado en áreas altamente esforzadas o potencialmente inestables.



Mina Chupa



Mina Yauliyacu

Métodos sostenidos con pilares

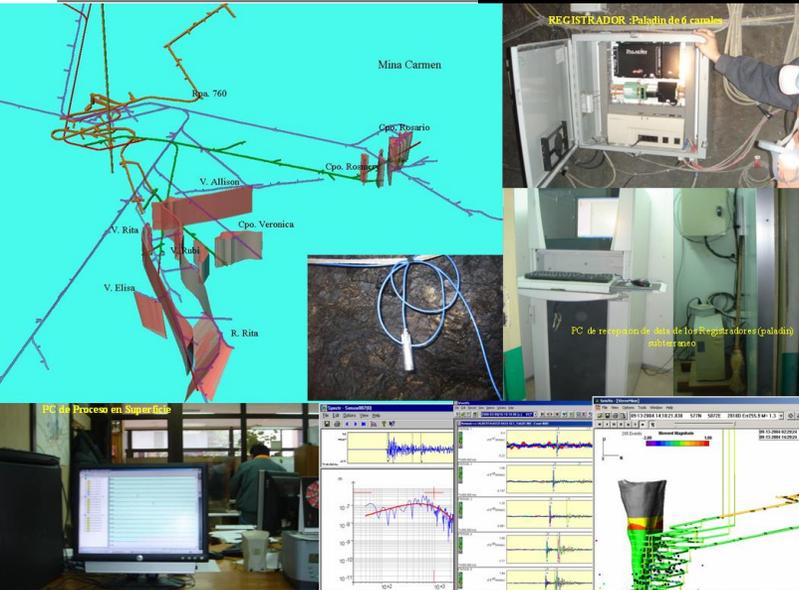


DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

Aspectos geomecánicos del método de minado SLS

Secuencia de avance del minado – Método SARC

Métodos sostenidos con pilares



Sismicidad inducida por el minado

EJEMPLOS DE MONITOREO SISMICO

04 Geomecánica de los métodos de minado (casos prácticos)

4a

Criterios geomecánicos para la selección del método de minado

4b

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido por pilares

4c

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido artificialmente

4d

Geomecánica en Métodos por Hundimiento

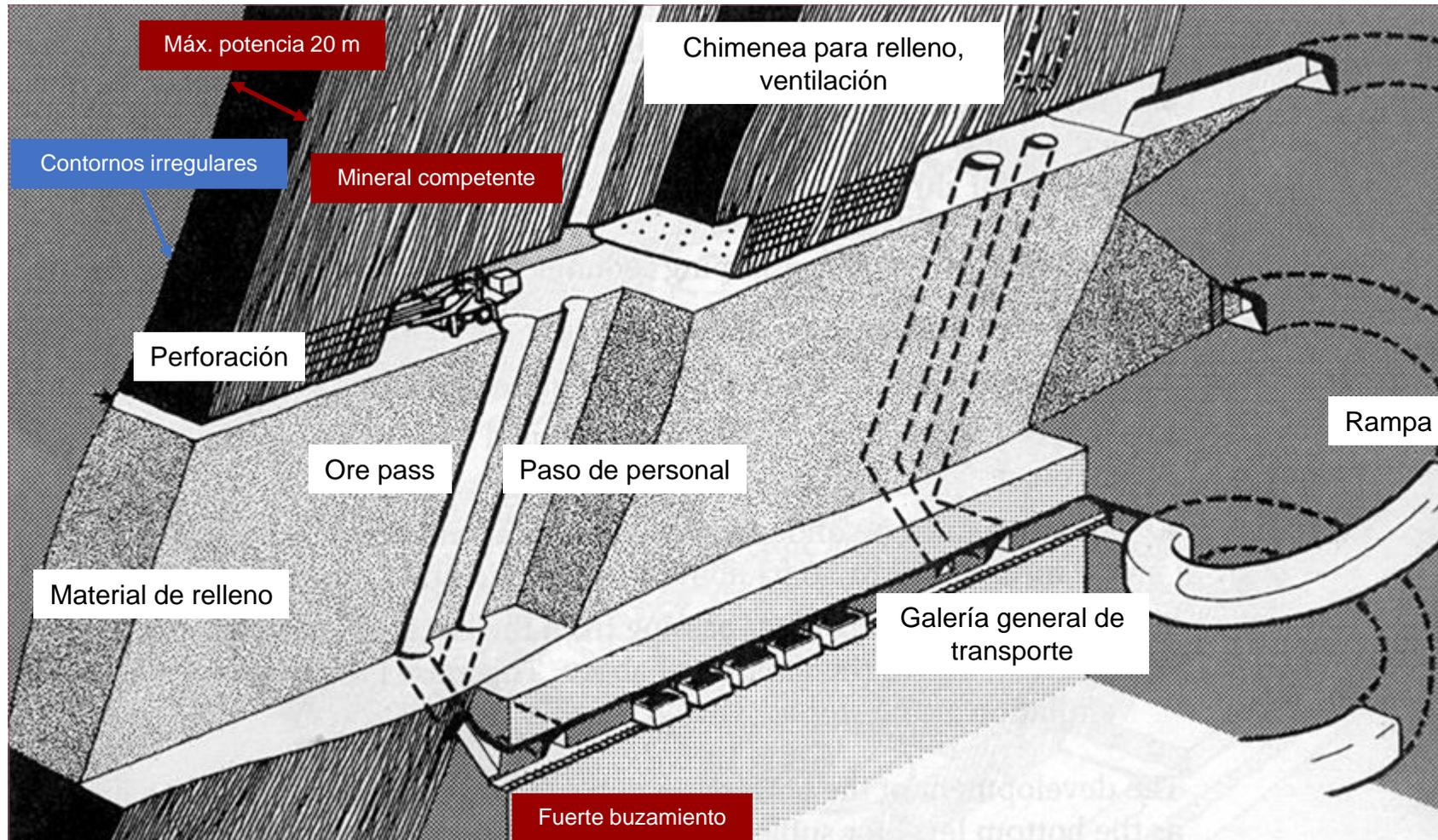


DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

Contenido



Método de minado corte y relleno – Cut & Fill (C&F)





Aspectos geomecánicos del método de minado C&F

- Métodos de minado por corte y relleno.
- Funciones mecánicas del relleno.
- Tipo de relleno, propiedades y colocación.
- Diseño geomecánico del relleno de mina.



Aspectos geomecánicos del método de minado C&F

Funciones mecánicas del relleno

- Asegurar la estabilidad regional de la mina a largo plazo, mediante el relleno de vacíos grandes potencialmente inestables.
- Controlar los desplazamientos local y de campo cercano alrededor de los vacíos minados.
- Disponer los desmontes de mina y de molienda.

Aspectos geomecánicos del método de minado C&F

Materiales usados para el relleno

- Relaves totales de concentradora.
- Relaves cicloneados.
- Arenas naturales.
- Agregados chancados y graduados.
- Desmonte rocoso (ejemplo: de los desarrollos).
- Agentes cementantes (cemento portland y puzolanas).
- Agua: para transporte y cementación.

Aspectos geomecánicos del método de minado C&F

Tipos de relleno

- Relleno hidráulico o con arenas (HF)
- Relleno hidráulico cementado (CHF)
- Roca seca (incluyendo desmonte) o relleno de agregados (DF)
- Relleno rocoso cementado (CRF)
- Relleno con agregados cementados (CAF)
- Relleno en pasta
- Rellenos compósitos (DF+HF, DF+CHF, pasta + relleno rocoso)

Métodos sostenidos artificialmente



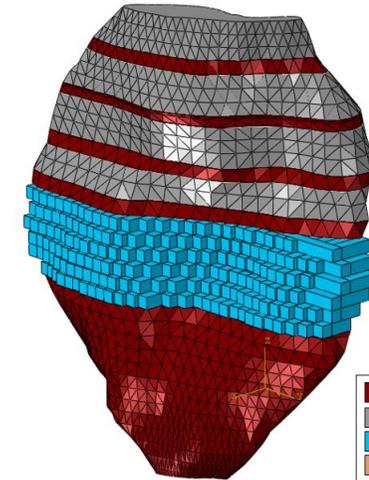
Modalidad corte y relleno Drift & Fill



(a)



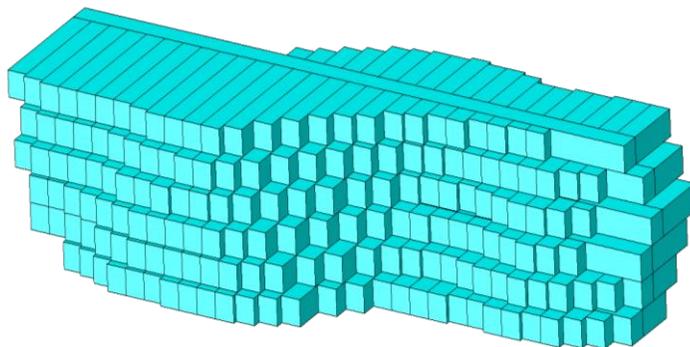
(b)



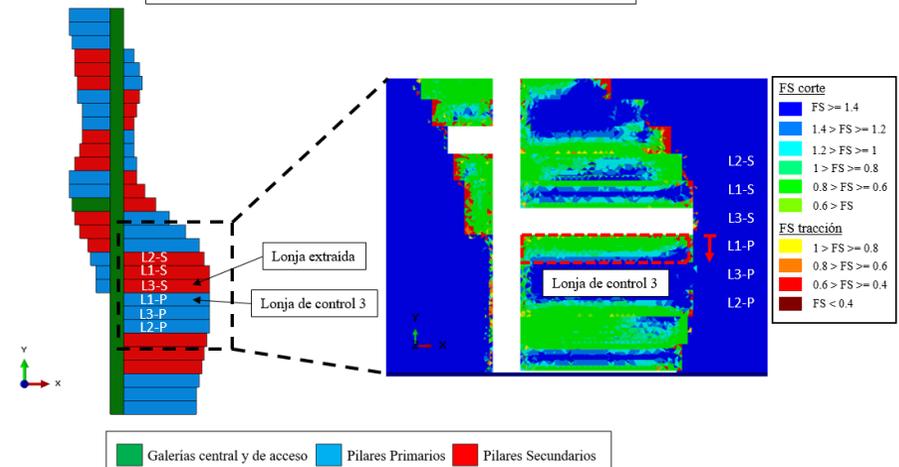
- Mineralización
- Relleno
- Zona modelada
- Chert Negro

- Galería de acceso
- Pilar Secundario
- Relleno
- Pilar Primario
- 1 Secuencia de Minado

Zona modelada
Mina El Roble



Lonja de control 3
Piso 3. Extracción de lonja 3 en Pilar Secundario.

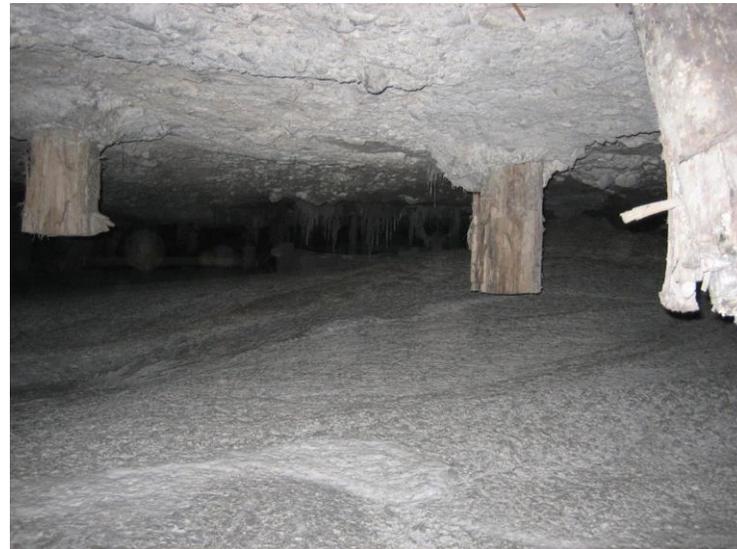


Métodos sostenidos artificialmente

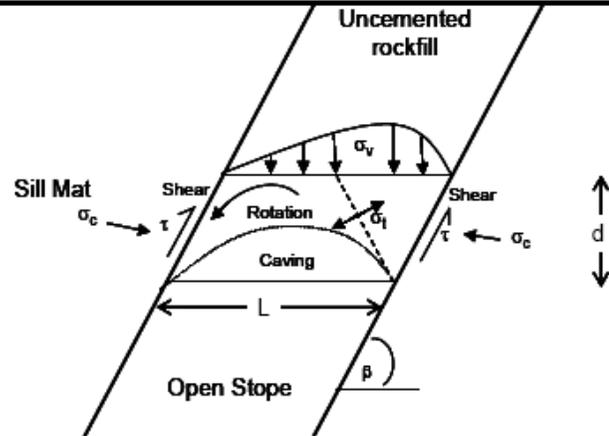


DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

Modalidad corte y relleno descendente con losas cementadas



Mecanismos de falla de las losas – Mitchell, 1991

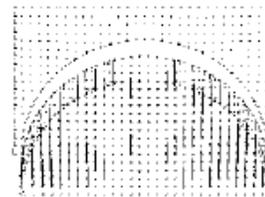


a) Schematic showing typical failure modes after Mitchell, 1991.

Where:

- L = Span of the stope
- γ = Rockfill's unit weight
- σ_t = Tensile strength of the cemented sill
- d = Thickness of sill
- σ_c = Horizontal confinement (assumed zero – conservative)
- σ_v = Vertical stress due loading above sill mat
- T_r = Shear strength along fill/wall contact
- β = Stope dip angle

Caving Failure



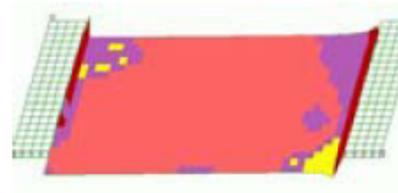
$$L \cdot \gamma > 8 \cdot \sigma_t / \pi$$

Flexural Failure



$$\left(\frac{L}{d}\right)^2 > \frac{2 \cdot (\sigma_t + \sigma_c)}{\sigma_v + d \cdot \gamma}$$

Sliding Failure



$$(\sigma_v + d \cdot \gamma) > 2 \cdot \left(\frac{\tau_r}{\sin^2(\beta)}\right) \cdot \left(\frac{d}{L}\right)$$

Rotational Failure



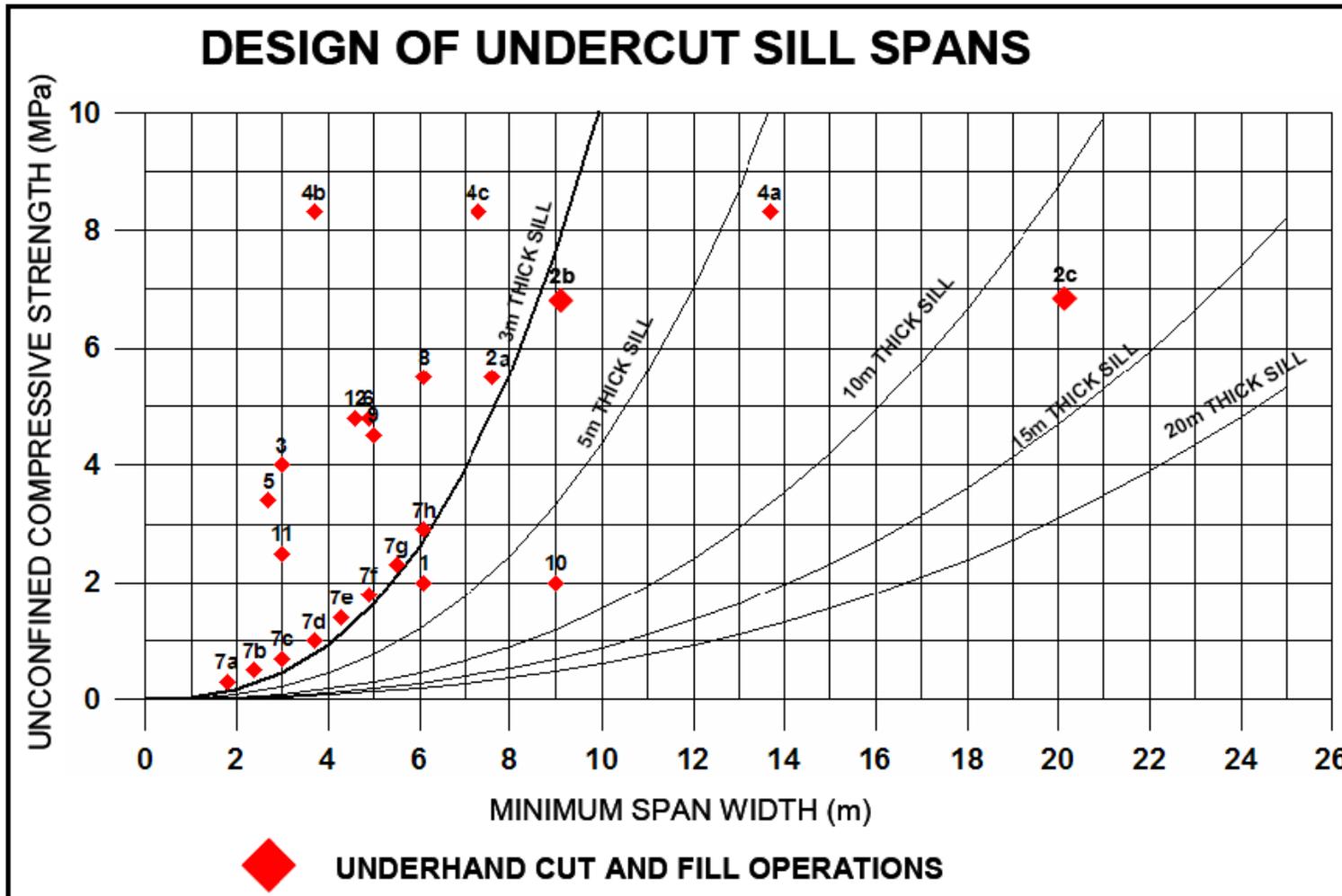
$$(\sigma_v + d \cdot \gamma) > \frac{d \cdot \sigma_t}{L \cdot (L - d \cdot \cot(\beta)) \cdot \sin^2(\beta)}$$

b) Limit equilibrium analysis of typical failure modes adapted from Mitchell, 1991.

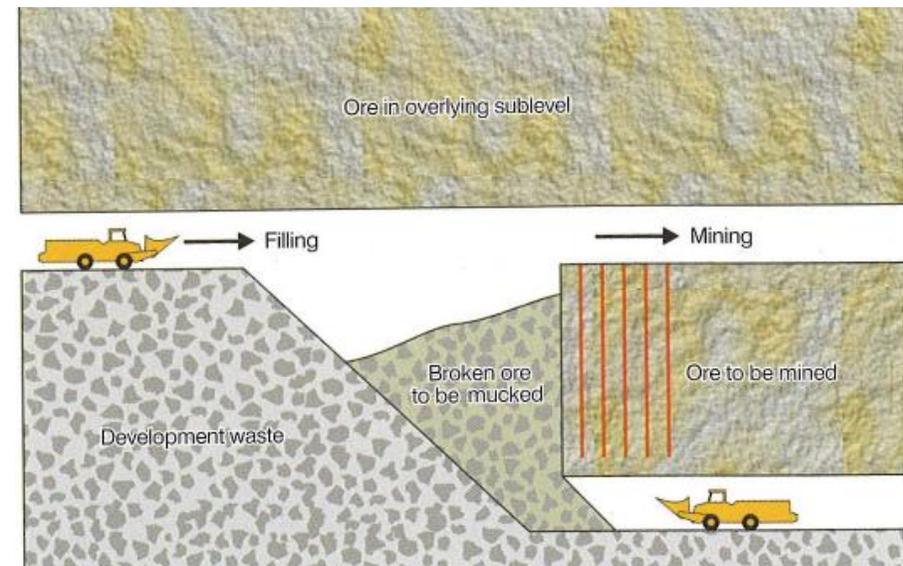
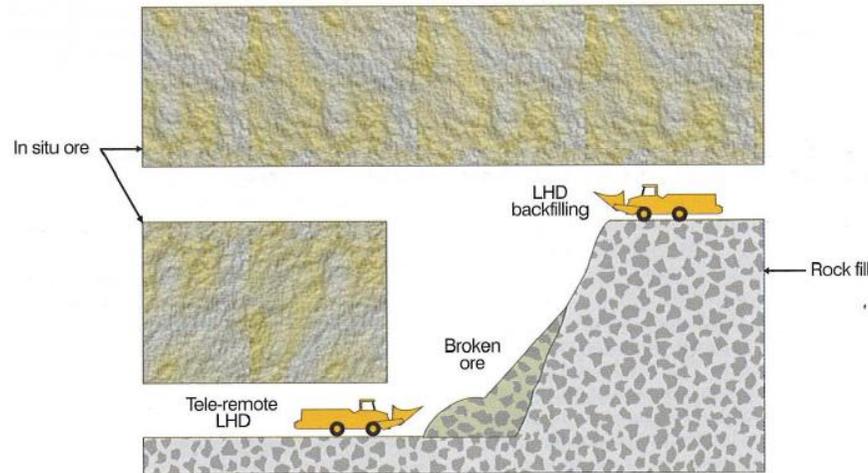
Métodos sostenidos artificialmente



Diagrama de estabilidad para el diseño de losas $FoS = 2$
Falla por flexión. Stone 1993



Método de minado por banqueo y relleno – Bench & Fill (B&F)



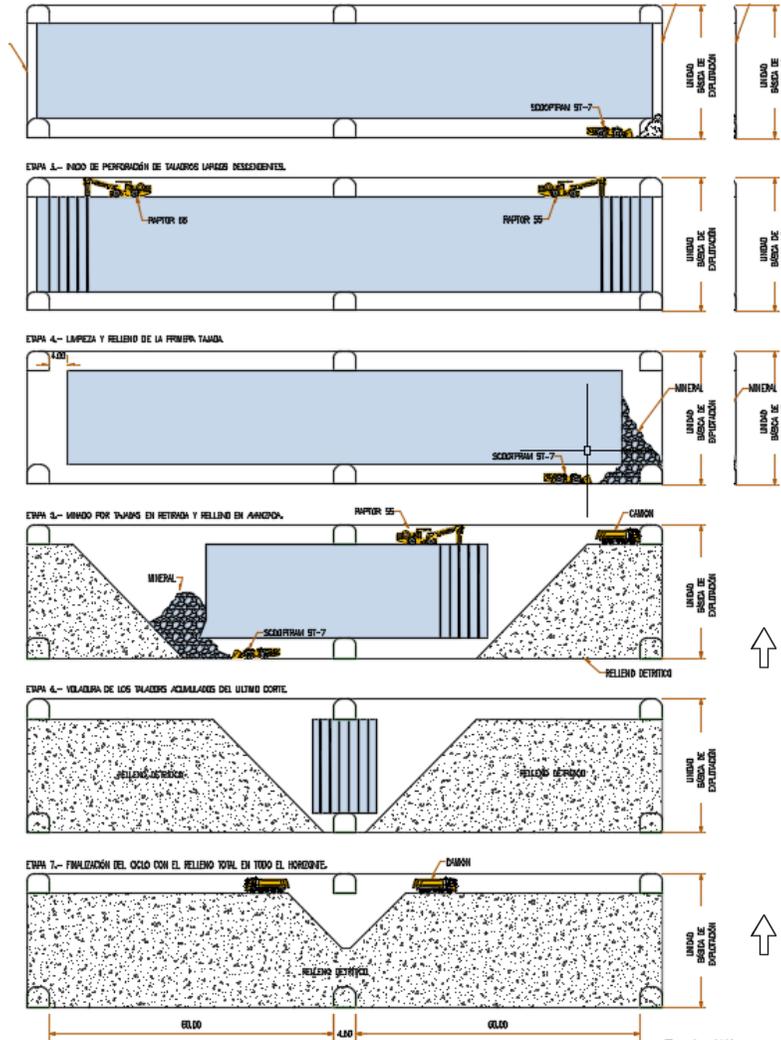


Aspectos geomecánicos del método de minado B&F

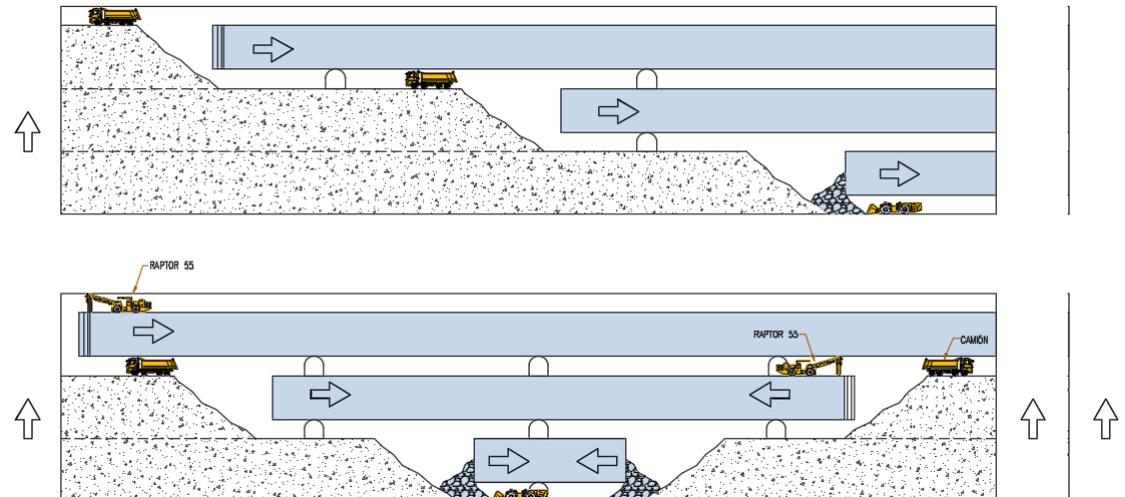
Similares consideraciones que el C&F

- Métodos de minado por banqueo y relleno.
- Funciones mecánicas del relleno.
- Tipo de relleno, propiedades y colocación.
- Diseño geomecánico del relleno de mina.

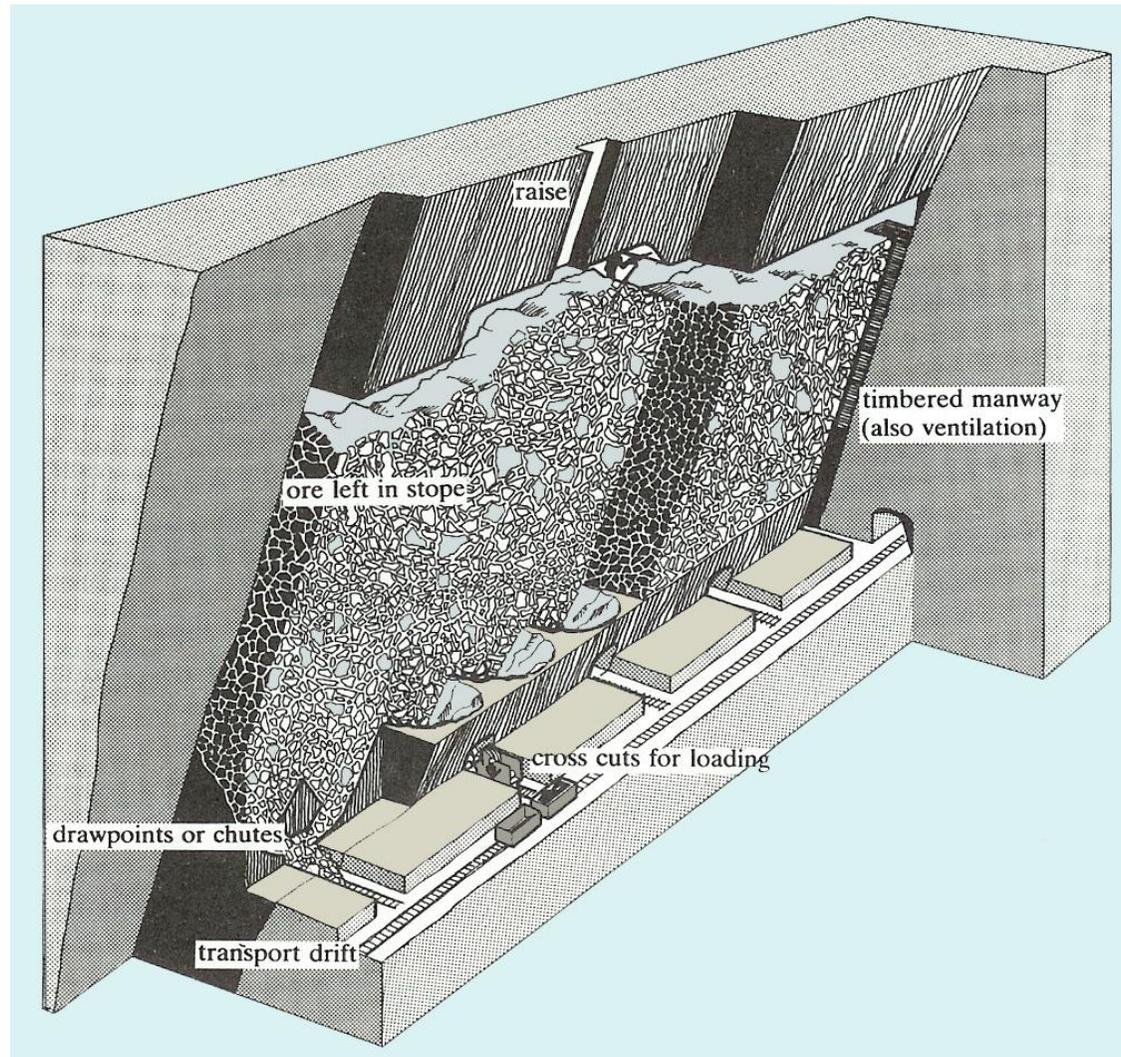
Aspectos geomecánicos del método de minado B&F



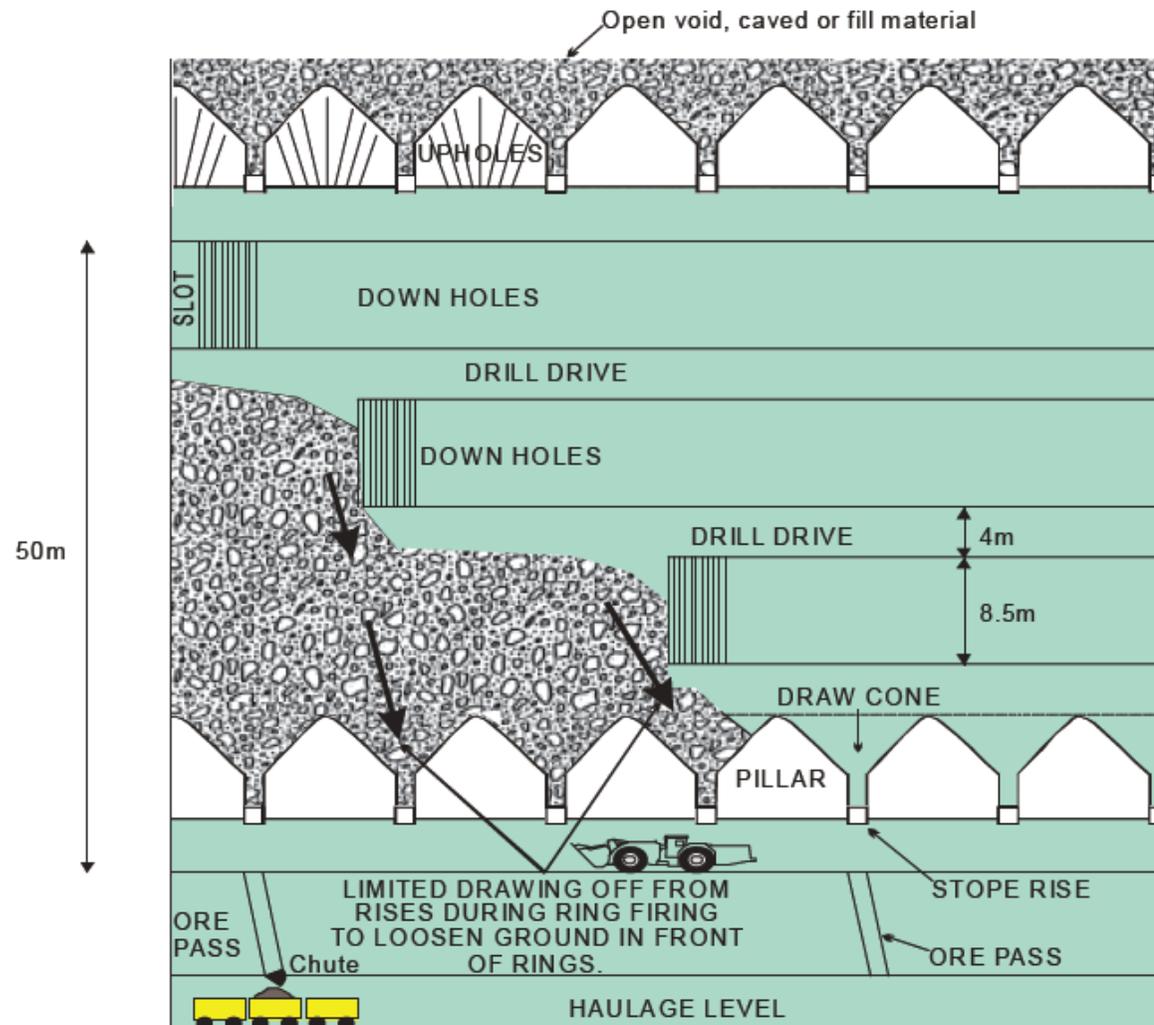
Secuencias de avance para más frentes de producción



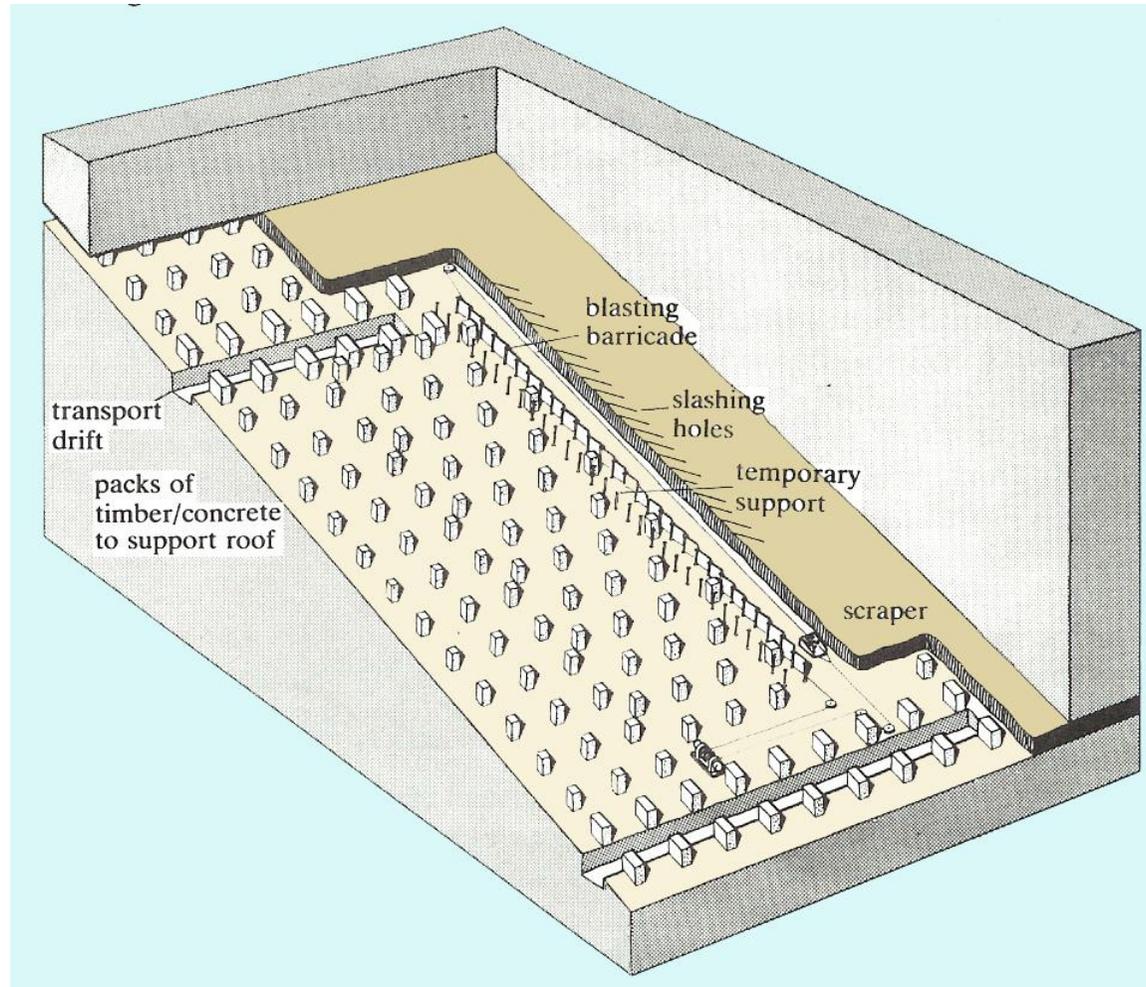
Método de minado por almacenamiento provisional – Shrinkage (SHR)



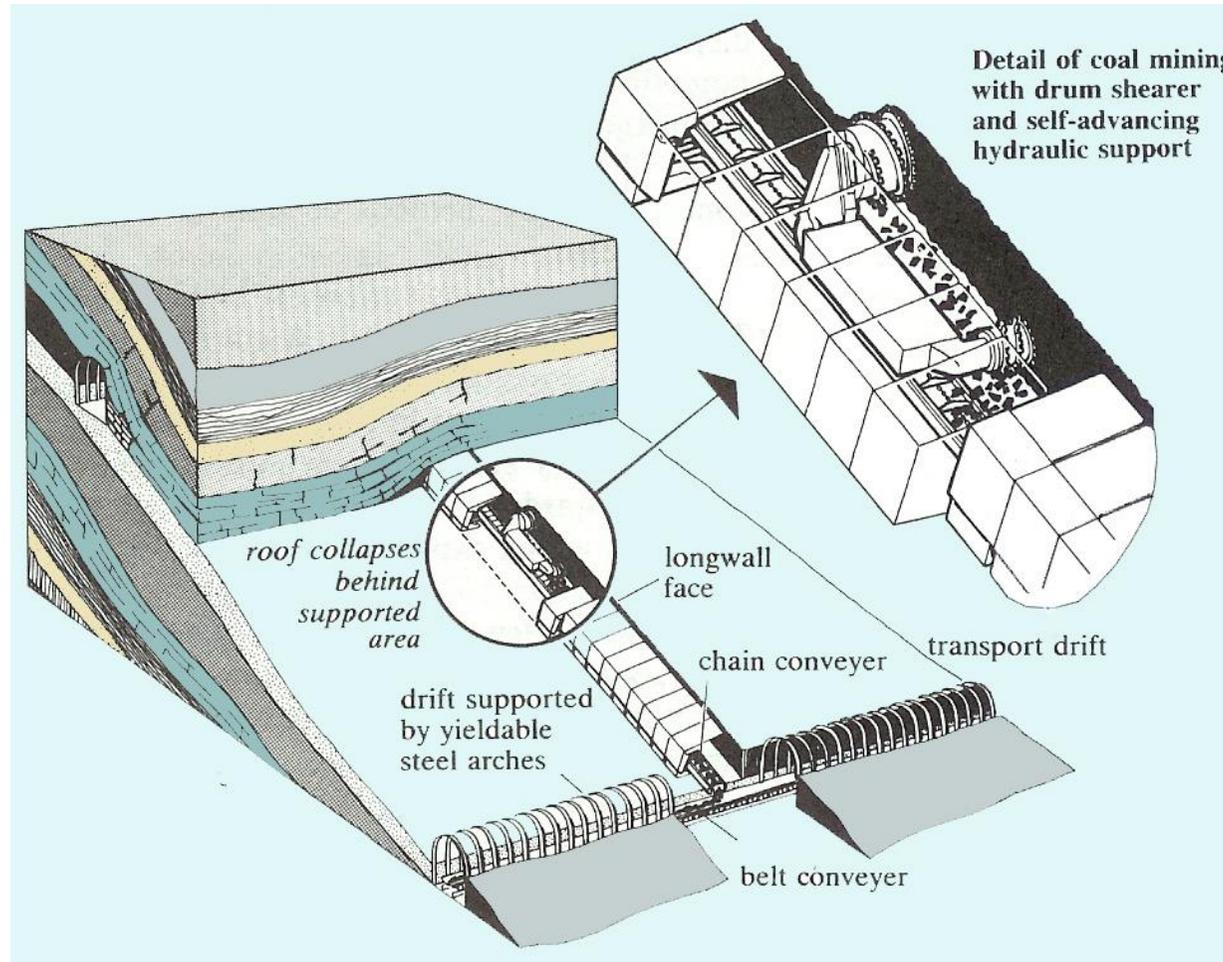
Método de minado SHR con taladros largos



Método de minado por frentes largos – Long Wall (LWM) en roca dura



Método de minado por frentes largos – Long Wall (LWM) en carbón



Aspectos geomecánicos del método de minado por frentes largos - LWM

- Lo deseable es tener un comportamiento pseudo continuo de la masa rocosa.
- Este comportamiento puede ser disturbado por:
 - Discontinuidades naturales o inducidas por el minado formando bloques que pueden caer o deslizarse desde la caja techo, o
 - Estallidos de rocas asociados con deslizamientos en discontinuidades (fallas, diques) o fracturamiento de la roca inducido por el minado.



Aspectos geomecánicos del método de minado por frentes largos - LWM

Requerimientos para el sostenimiento

- Acomodar y controlar el cierre cuasi estático y dinámico del tajeo.
- Sostener la caja techo fracturada.
- Lograr un medioambiente de trabajo seguro en la vecindad del frente, incluyendo eventos de estallidos de roca.



Aspectos geomecánicos del método de minado por frentes largos - LWM

Parámetros críticos de las condiciones de la masa rocosa

- Altura de la falla potencial de la roca.
- Velocidad del cierre cuasi estático de los tajeos.
- Velocidad del cierre dinámico de los tajeos.
- Esfuerzos compresivos de la caja techo.
- Espaciamiento de las discontinuidades, orientación y propiedades de la interfase.



Aspectos geomecánicos del método de minado por frentes largos - LWM

Parámetros críticos del sostenimiento

- Longitud del sostenimiento.
- Velocidad de la compresión.
- Consistencia del rendimiento (ejemplo: de los elementos de madera).
- Cobertura areal de los sistemas de sostenimiento.

04 Geomecánica de los métodos de minado (casos prácticos)

4a

Criterios geomecánicos para la selección del método de minado

4b

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido por pilares

4c

Geomecánica en Métodos de Minado sostenido artificialmente

4d

Geomecánica en Métodos por Hundimiento

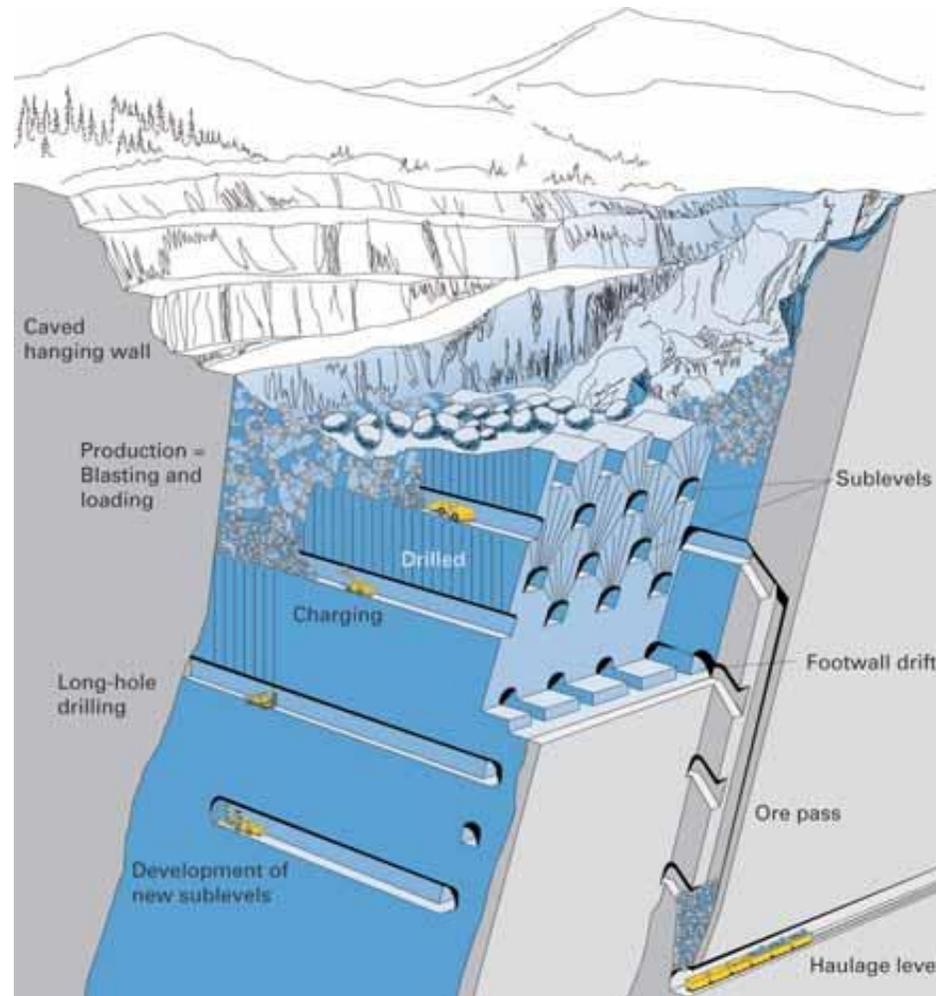


DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

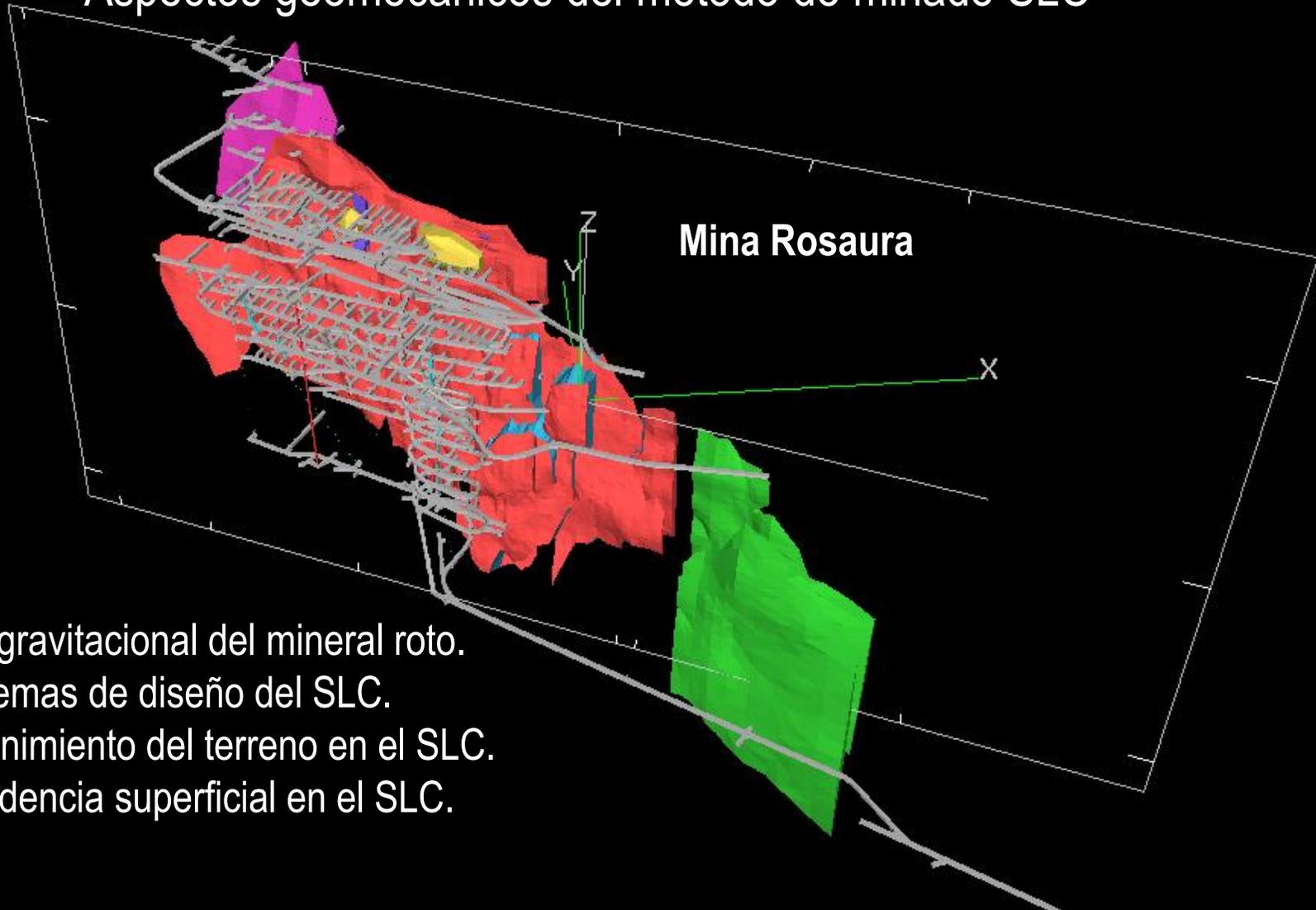
Contenido



Método de minado hundimiento por subniveles – Sublevel Caving (SLC)



Aspectos geomecánicos del método de minado SLC

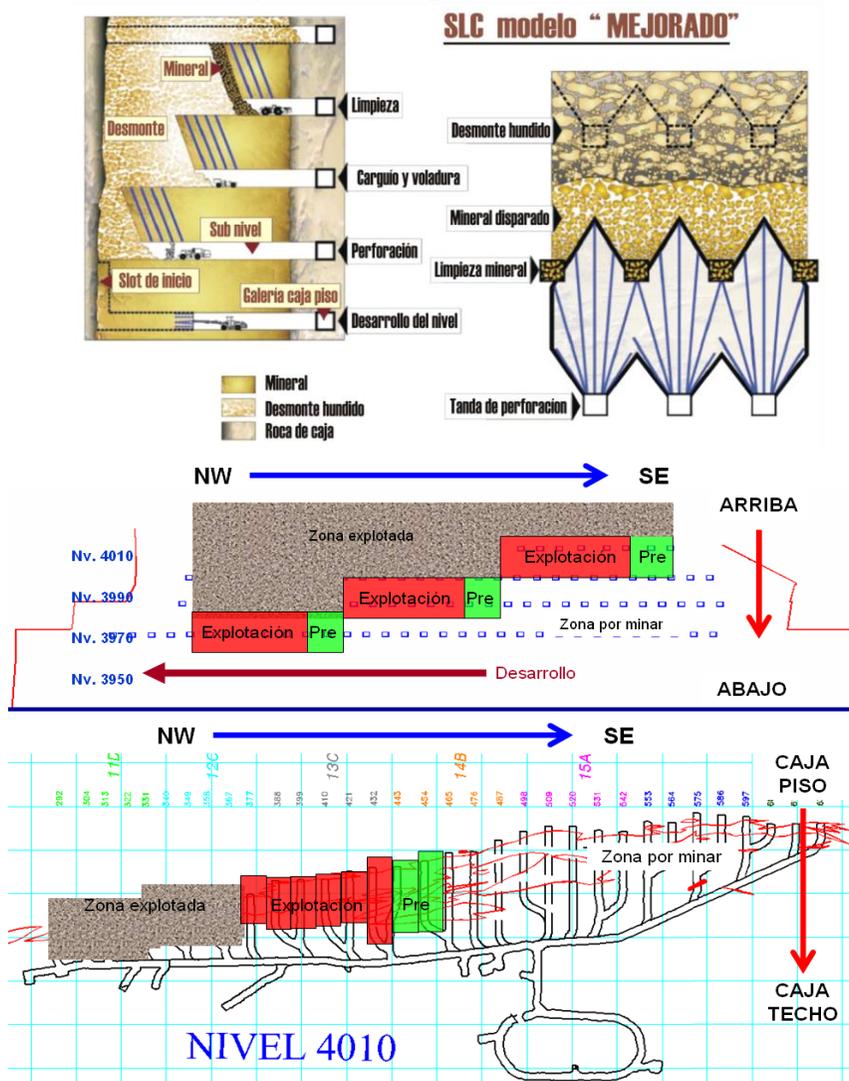


- Flujo gravitacional del mineral roto.
- Esquemas de diseño del SLC.
- Sostenimiento del terreno en el SLC.
- Subsistencia superficial en el SLC.

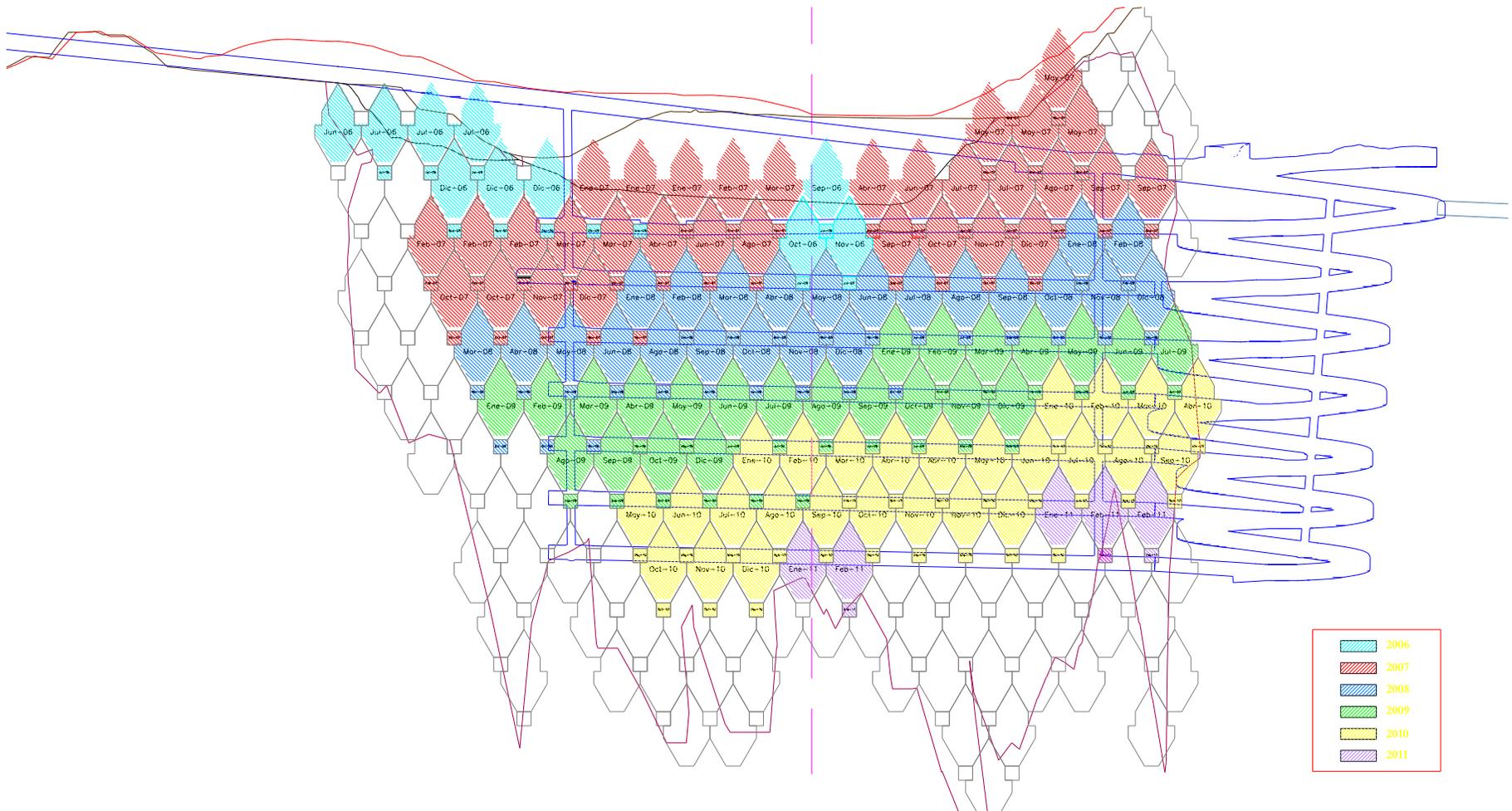
Métodos de hundimiento



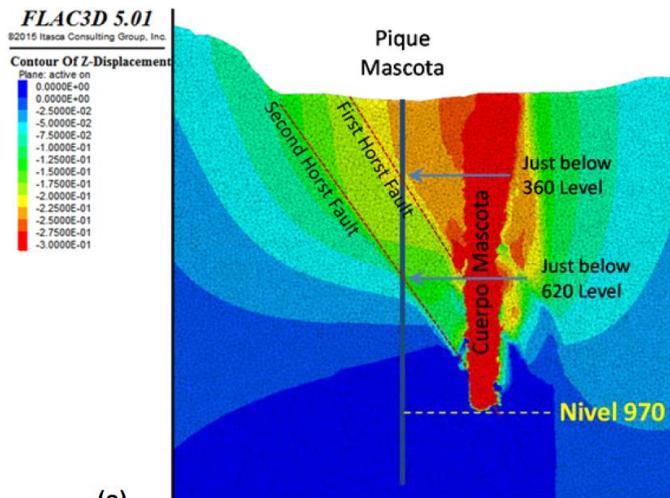
Aspectos geomecánicos del método de minado SLC



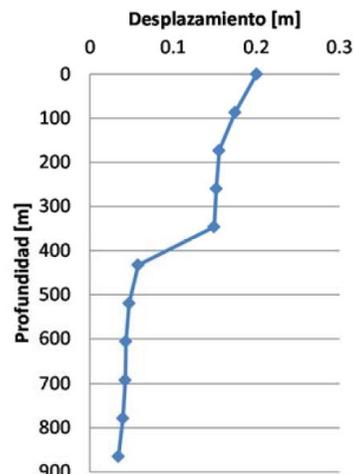
Aspectos geomecánicos del método de minado SLC Secuencia de avance del minado – Mina Tinyag



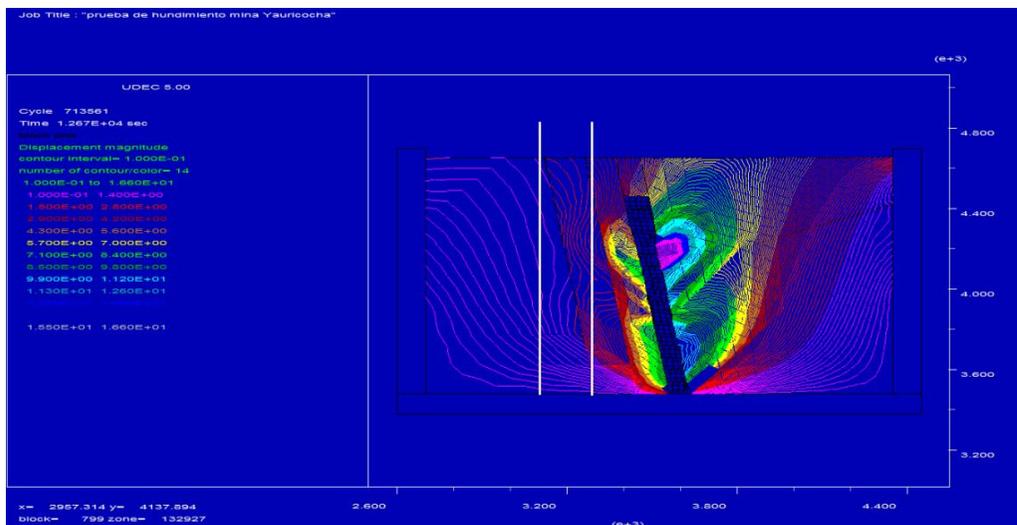
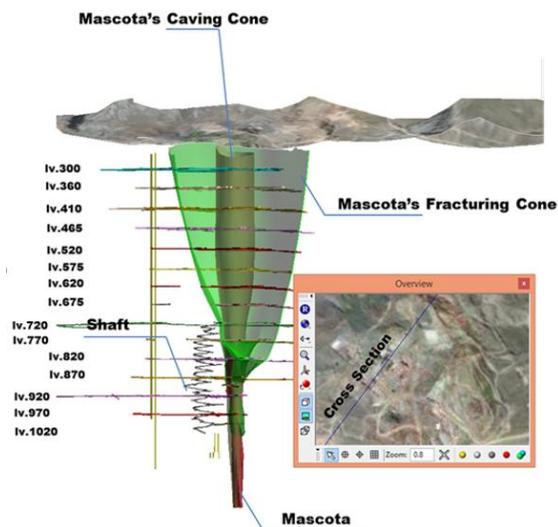
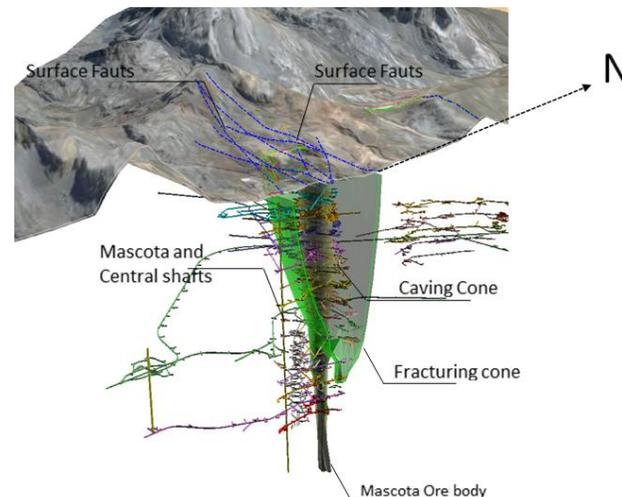
Subsidencia asociada al SLC en Mina Yauricocha



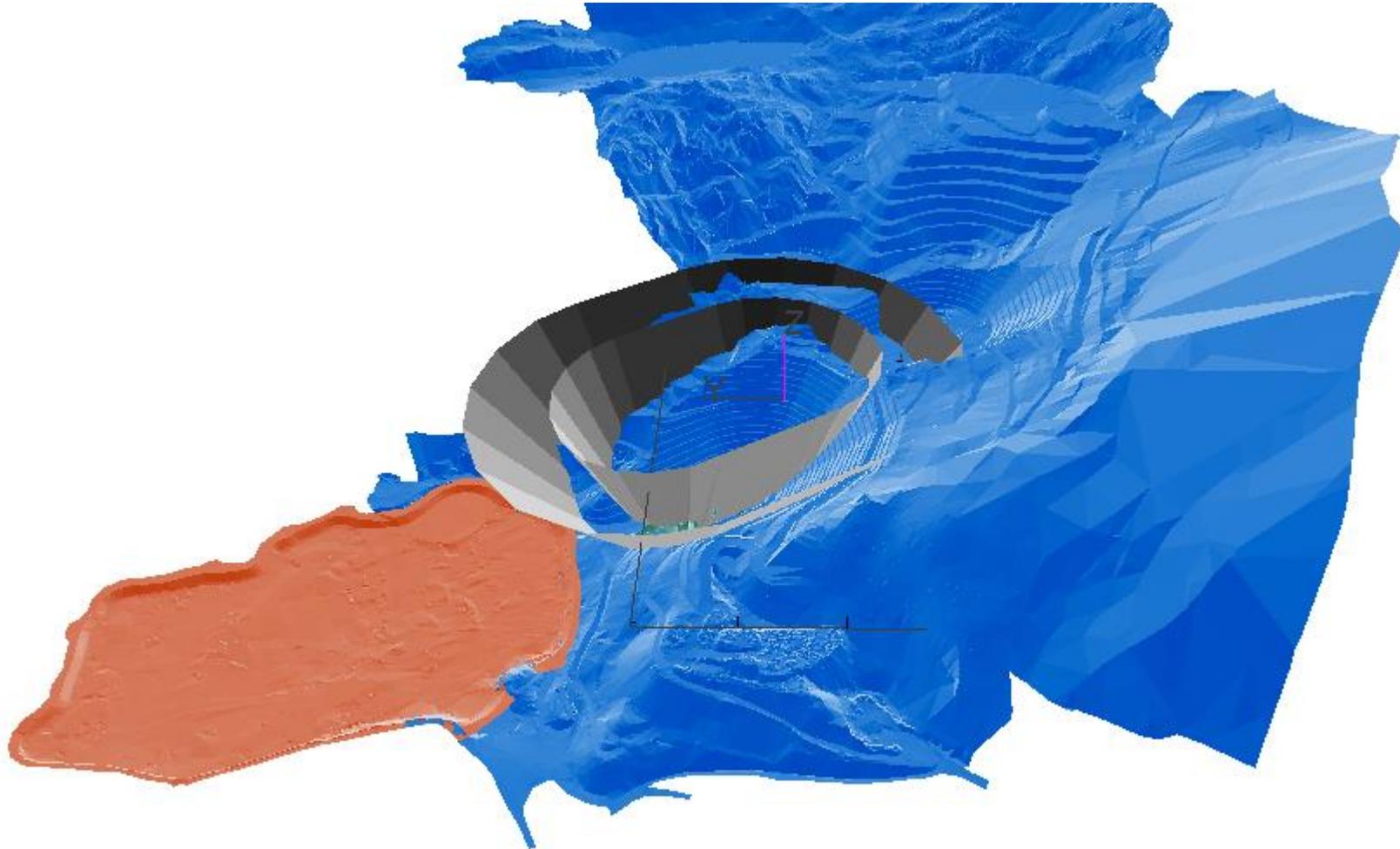
(a)



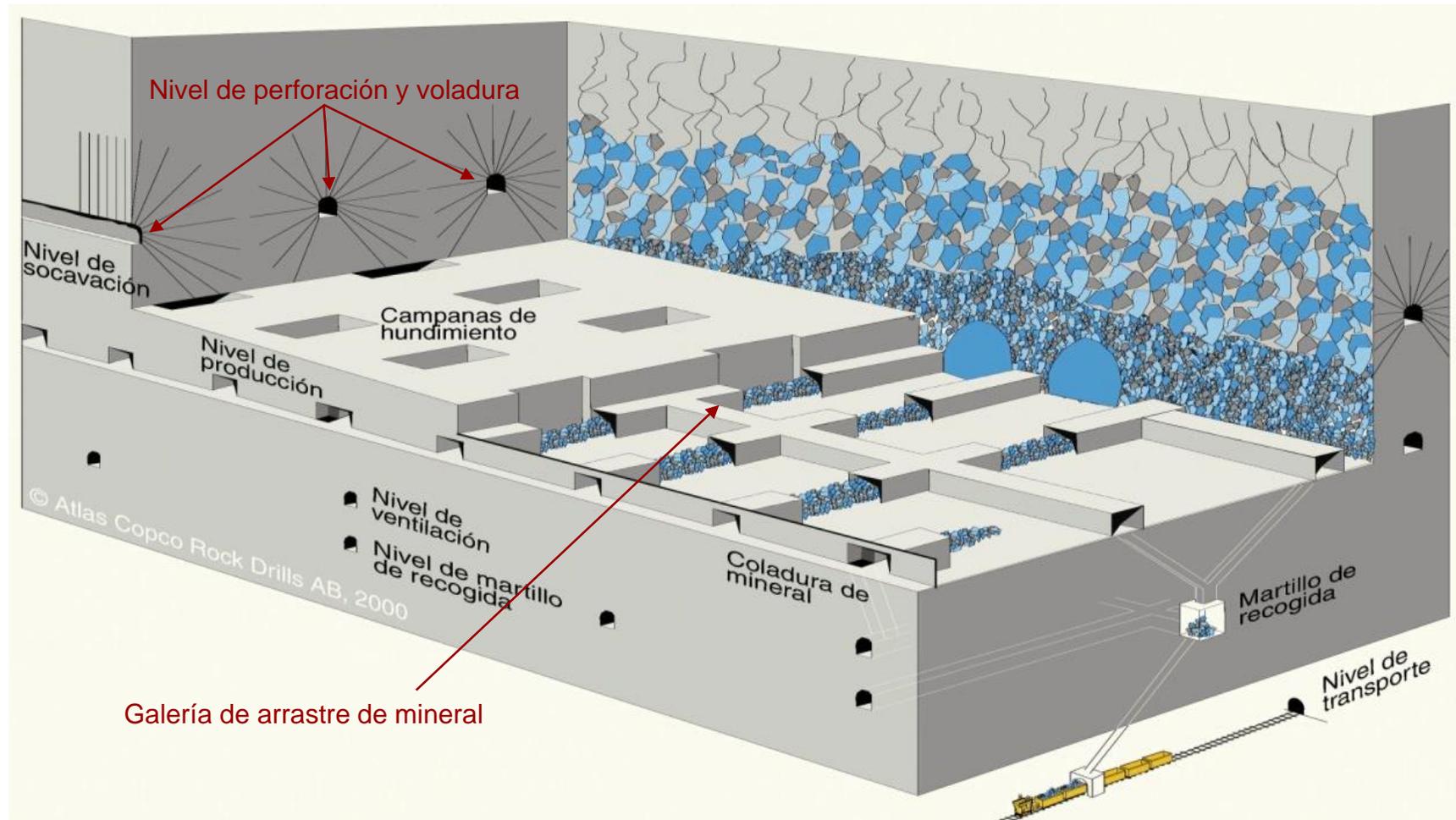
(b)



Angulos de desplome y de fracturamiento – Minas Rosita y Tinyag

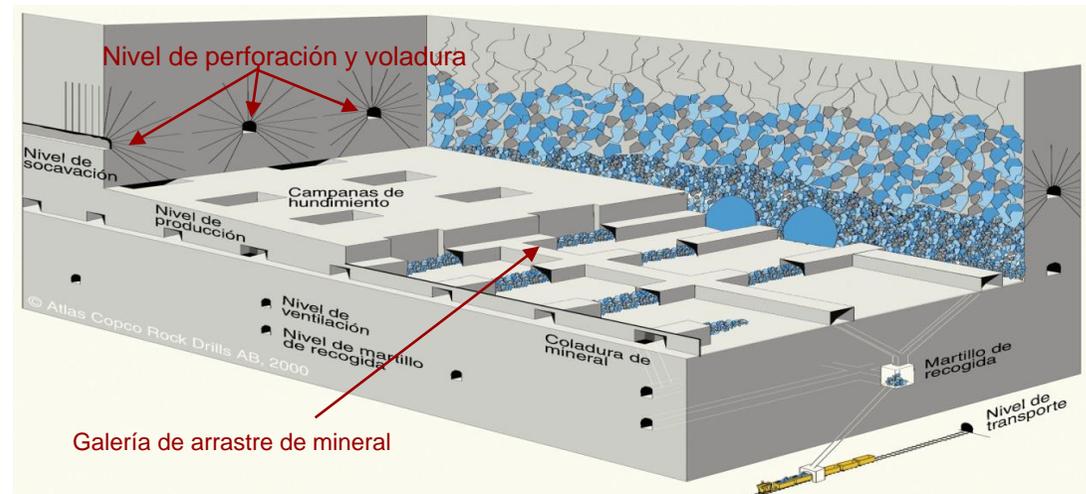
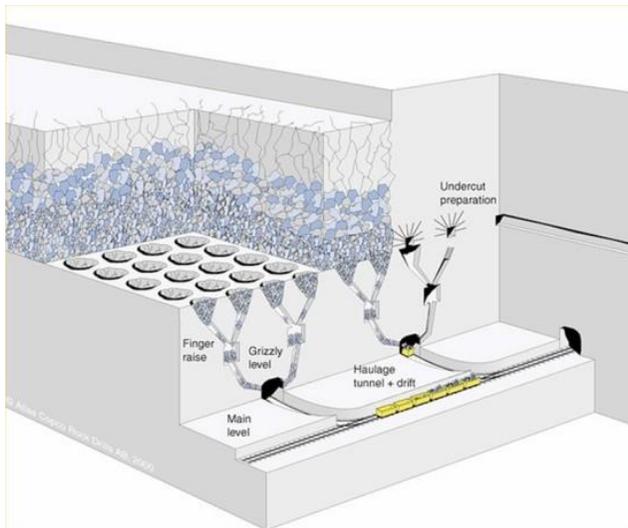


Método de minado hundimiento por bloques y paneles Block and Panel Caving - BPC

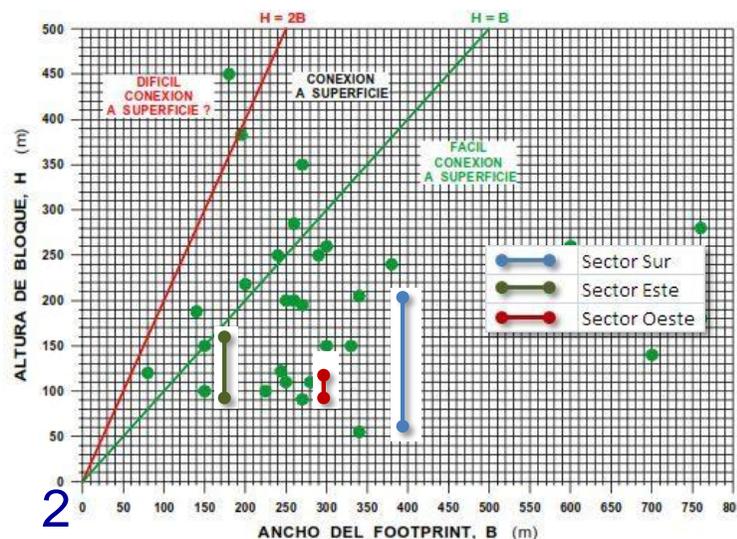
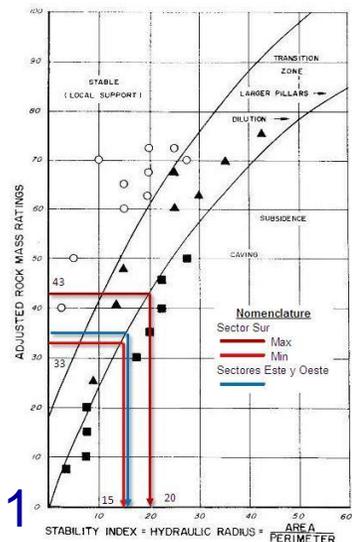


Aspectos geomecánicos del método de minado BPC

- Mecánica básica del hundimiento.
- Evaluación de la hundibilidad.
- Naturaleza e importancia de la fragmentación.
- Medición y evaluación de la fragmentación.
- Diseño de corte inferior (undercutting) y nivel de extracción en el BPC.
- Subsistencia superficial.



Métodos de hundimiento



1 Gráfico de hundibilidad de Laubscher

2 Propagación del hundimiento (Karzulovic)

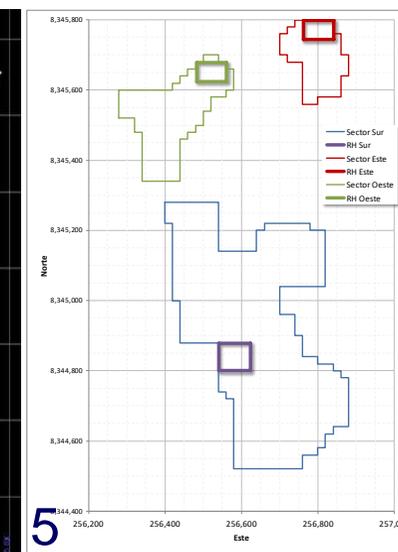
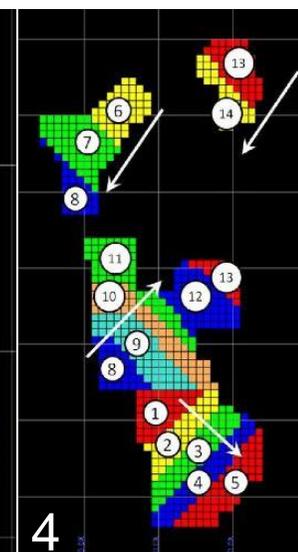
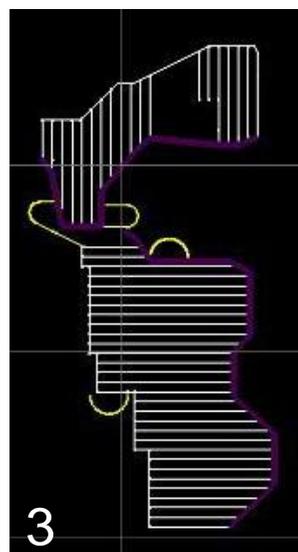
Ref.: AMEC (2012)

Proyecto Corocchohuayco

3 Nivel de hundimiento

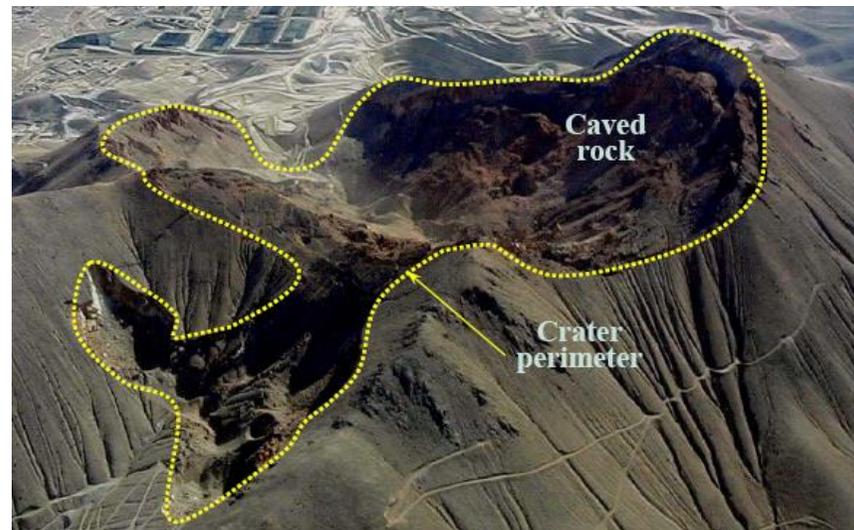
4 Secuencia de socavación

5 Areas mínimas de inicio del hundimiento



Subsidencia asociada al método de minado BPC

- Subsistencia continua y discontinua.
- Fenómeno de subsidencia en el BPC.
- Métodos de análisis y predicción de la subsidencia.
 - Abacos empíricos.
 - Métodos de equilibrio límite.
 - Métodos numéricos.
- Predicción de la subsidencia en la práctica del BPC.



Flores & Karzulovic 2002

- El control de la estabilidad de las excavaciones asociada a la explotación de un yacimiento nace con el buen Planeamiento y Diseño del minado.
- Los modelos geológico y geomecánico del yacimiento son la base para todo análisis de diseño de excavaciones rocosas, por lo que en cada proyecto u operación minera se debe mantener actualizada esta información.
- Los aspectos geomecánicos de la masa rocosa del yacimiento juegan un rol muy importante en la selección del método de minado.
- El diseño o dimensionamiento del minado tiene sus propias características según cada método de explotación. Cada método tiene sus aspectos geomecánicos propios.
- Una de las herramientas importantes para controlar la estabilidad local y global de la mina es el secuenciamiento del minado, por lo que se le debe prestar mucha atención.
- Para el sostenimiento (incluyendo el relleno) se deben establecer estándares de control de calidad antes, durante y después de su instalación para: materiales, equipos, procedimiento y rendimiento.

SIMULATION OF SURFACE SUBSIDENCE DEVELOPMENT ASSOCIATED WITH BLOCK CAVING MINING USING FEM/DEM APPROACH

Alex Vyazmensky © 2008 <http://alex.vyazmensky.googlepages.com/>

SFU Engineering Geology and Resource Geotechnics Research Group

GRACIAS

