

# MÉTODOS DE CONTROL DE LA ESTABILIDAD



### 3.1 INTRODUCCIÓN

Es importante reconocer que hay dos escalas involucradas en la creación de problemas de inestabilidad potencial de la masa rocosa asociadas al minado subterráneo. La primera escala, la cual puede ser denominada escala de mina (visión macro), es la que involucra a todo el cuerpo mineralizado, la infraestructura de la mina y la masa rocosa circundante. La segunda escala o escala local (visión micro), está limitada a la masa rocosa circundante a las labores mineras subterráneas.

La composición y naturaleza del **cuerpo mineralizado** y de la **roca encajonante circundante**, los esfuerzos in situ, la geometría y secuencia de excavación de los tajeos, tienen influencia sobre la estabilidad global de la mina. El minado de los tajeos en una secuencia incorrecta, el dejar pilares de tamaños inadecuados, la ubicación incorrecta de los piques y echaderos de mineral, en áreas que probablemente estarán sujetas a cambios importantes de los esfuerzos, son todos ellos problemas que tienen que ser tratados considerando la geometría global de la mina.

Por otro lado, la estabilidad de la roca circundante a un simple tajeo, a una estación de pique o a una rampa, depende de los esfuerzos y las condiciones estructurales de la masa rocosa dentro de unas pocas decenas de metros de los bordes de la excavación. Los esfuerzos locales son influenciados por las condiciones de escala de mina, pero las inestabilidades locales serán controladas por los cambios locales en los esfuerzos, por la presencia de rasgos estructurales y por la cantidad de daño causado a la masa rocosa por la voladura.

Es necesario, por tanto, controlar las condiciones de estabilidad tanto a escala de mina como a escala local, pero es esta última la que tiene mayor importancia, desde que los problemas potenciales de inestabilidad constituyen un peligro para la seguridad del personal como para los equipos y también para la rentabilidad de la operación minera. A fin de contrarrestar este peligro, es necesario adoptar medidas de control de la estabilidad de las labores mineras.

En tal sentido, los problemas de inestabilidad de la masa rocosa de las labores mineras pueden ser minimizados:

- Planeando la forma de la mina en relación al 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.

Todo el personal de la mina, debe estar familiarizado con estas técnicas de tal manera que puedan aplicarlas, para controlar apropiadamente las condiciones de estabilidad de las labores mineras.

## 3.2 PLANEAMIENTO DE MINADO

En la minería subterránea, la exploración mediante perforaciones diamantinas, es usualmente llevada a cabo con el fin de identificar el tonelaje y la ley del mineral. Además, los testigos de las perforaciones diamantinas constituyen también una buena fuente de información geomecánica. Éstos proporcionan datos sobre el grado de fracturamiento, ubicación y orientación de estructuras geológicas principales como fallas, zonas de corte, zonas de alteración (en general zonas de debilidad) de la masa rocosa, asimismo sobre la resistencia de la roca y calidad de la masa rocosa. Conociendo esta información, se podrá evaluar su influencia sobre la estabilidad de las futuras excavaciones. Por ello, es importante que las compañías mineras lleven a cabo registros geotécnicos de los testigos de las perforaciones diamantinas, en adición a los registros convencionales con fines de geología económica.

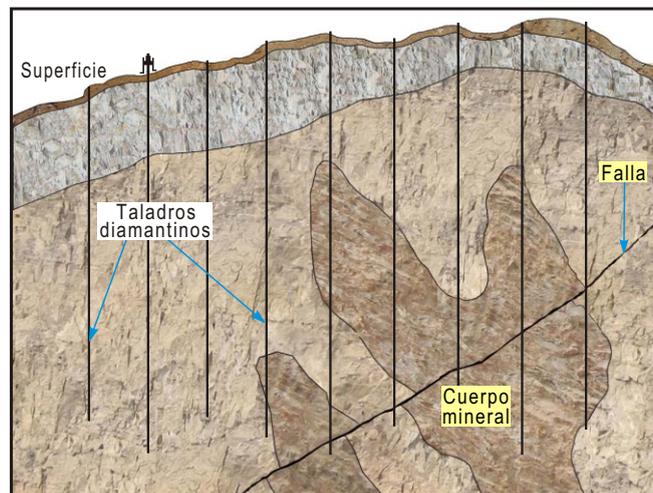


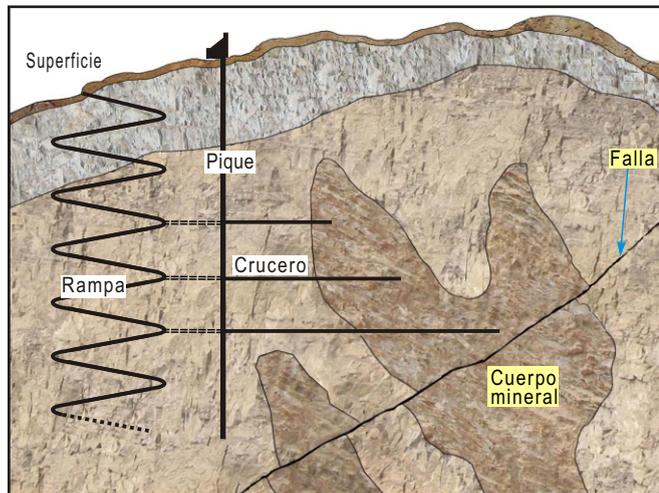
Figura 3.1 Perforaciones diamantinas realizadas desde superficie.



Figura 3.2 Testigos de perforación diamantina.

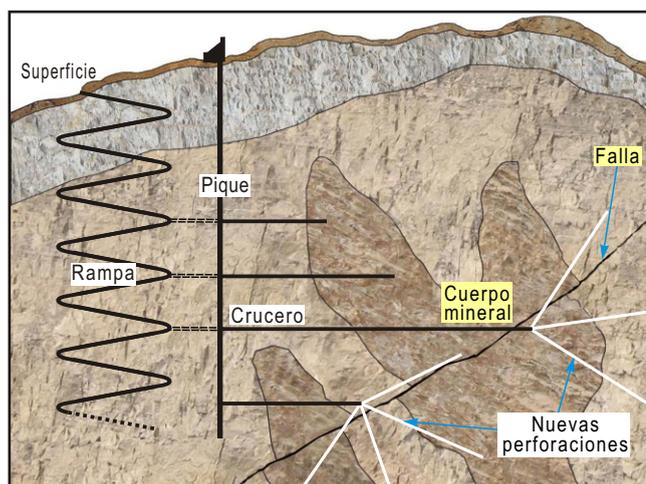
Cuando una mina es nueva, los sondeos de perforación diamantina ejecutados desde la superficie, proporcionan a los ingenieros de planeamiento y diseño, la

forma, orientación y leyes de mineral del cuerpo mineralizado, así como la información geomecánica. Con toda esta información, determinarán las mejores ubicaciones de los piques, galerías de nivel, rampas de acceso, chimeneas de ventilación y otras excavaciones importantes.



**Figura 3.3** Ubicación de excavaciones principales.

En la siguiente etapa, los testigos rocosos extraídos de los nuevos programas de perforaciones diamantinas de detalle, en este caso, ejecutados desde las labores subterráneas, proporcionarán a los ingenieros de planeamiento y diseño, información específica sobre las leyes del mineral, el tamaño del cuerpo mineralizado y la información geomecánica, en base a los cuales se podrán identificar los problemas potenciales que podrían afectar a las condiciones de estabilidad de las labores mineras, conforme avance la explotación de la mina.



**Figura 3.4** Perforaciones diamantinas realizadas desde interior mina.

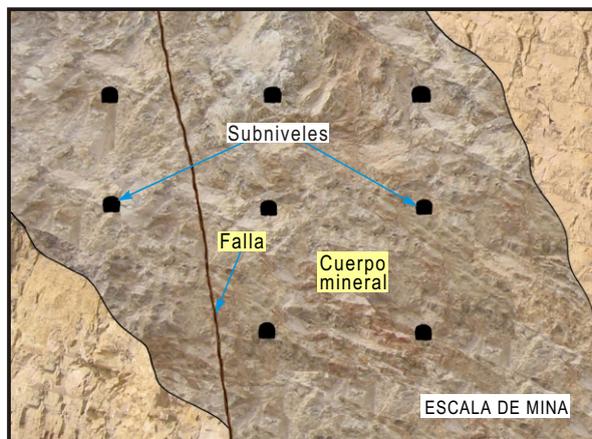
Con la información probada de las perforaciones diamantinas de detalle, los ingenieros de planeamiento y diseño, establecerán todas las labores de desarrollo de la mina y determinarán la mejor estrategia de minado para la explotación, definiendo los mejores esquemas y secuencias de avance del minado para la extracción del mineral y las estrategias de control de la estabilidad a escala

de mina y escala local, respecto a la presencia de fallas geológicas u otras estructuras principales, que pudieran tener efectos adversos sobre la estabilidad de las excavaciones, de tal manera que sean minimizadas las interrupciones de la producción.



*Figura 3.5 Diseño y planeamiento de la mina.*

El concepto de estabilidad a escala mina, en el diseño de la estructura de la mina, dará un conocimiento a nivel macro de la misma, lo cual ayudará a todo el personal a entender los problemas de inestabilidad de la masa rocosa de las excavaciones a escala local.

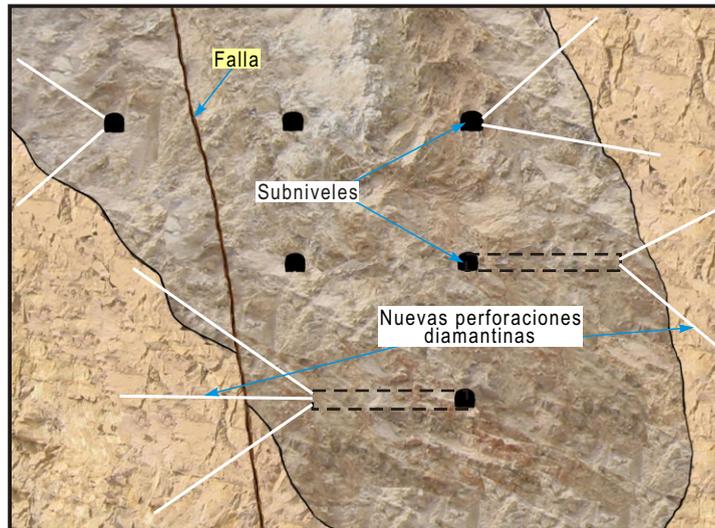


*Figura 3.6 Escala de mina o visión Macro.*



*Figura 3.7 Escala local o visión Micro.*

A medida que progrese la explotación de la mina y se extraiga cada vez más mineral, las perforaciones diamantinas seguirán siendo un aspecto importante en el proceso de minado, puesto que éstas no solamente permitirán encontrar nuevas reservas de mineral, sino también permitirán identificar las condiciones geomecánicas de la masa rocosa que podrían afectar la estabilidad global y local de la mina.



*Figura 3.8 Nuevos programas de perforaciones diamantinas.*

### 3.3 FORMA, TAMAÑO Y ORIENTACIÓN DE LAS EXCAVACIONES

#### 3.3.1 Forma de las excavaciones

Para tener mejores condiciones de estabilidad de las labores mineras, se deberán evitar las formas cuadradas o rectangulares de las excavaciones y en general las formas esquinadas. Techos en forma de arco de las labores de avance y de los tajeos, significan condiciones de estabilidad favorables.



Figura 3.9 Formas esquinadas desfavorecen la estabilidad.



Figura 3.10 La forma en arco de las excavaciones favorece la estabilidad.

Cuando la masa rocosa de una excavación, presenta rasgos estructurales que definen cuñas potenciales en el techo o en las paredes, formadas por sistemas de discontinuidades o estratos, la forma de la excavación debe acomodarse a los rasgos estructurales dominantes de la masa rocosa, aunque esto signifique que la excavación no tendrá una estética apropiada, sin embargo será más estable. De lo contrario, tendría que utilizarse sostenimiento.



Figura 3.11 Acomodo de la excavación a los rasgos estructurales.

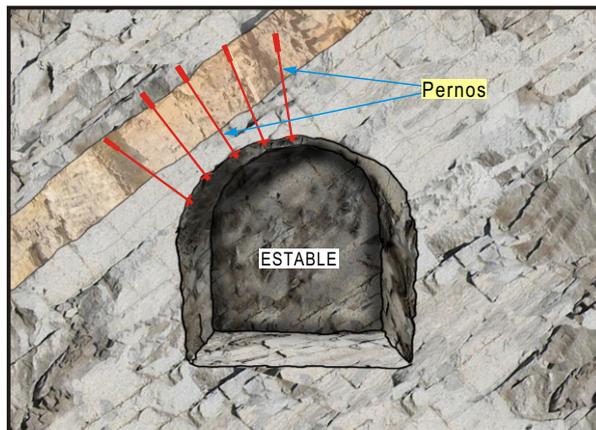


Figura 3.12 Sostenimiento necesario para favorecer la estabilidad.

### 3.3.2 Tamaño de las excavaciones

El tamaño de las excavaciones depende de las condiciones geomecánicas de la masa rocosa. Una guía para establecer el tamaño de los tajeos, que son las excavaciones más importantes de una mina, tomando en cuenta solamente la calidad de la masa rocosa, es mostrada en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1**

**Guía para establecer el tamaño máximo de los tajeos**

Calidad de masa rocosa	Rango RMR*	Tamaño del tajeo	
		Ancho (m)	Altura (m)
Muy Buena	81 - 100	25 - 35	35 - 50
Buena	61 - 80	16 - 25	25 - 35
Regular A	51 - 60	10 - 16	18 - 25
B	41 - 50	6 - 10	9 - 18
Mala A	31 - 40	4 - 6	6 - 9
B	21 - 30	2.5 - 4	2.5 - 6
Muy Mala	< 21	< 2.5	< 2.5

Nota: El RMR\* tiene que estar corregido tomando en cuenta la orientación de las discontinuidades estructurales.

Las dimensiones de ancho y altura de tajeos establecidas en el cuadro anterior, corresponden a dimensiones máximas sin sostenimiento sistemático, lo cual no significa que no se utilice ningún sostenimiento. El sostenimiento esporádico (local o aislado) deberá ser utilizado según el terreno lo requiera, aún en las mejores condiciones de la masa rocosa.



*Figura 3.13 Sostenimiento local con pernos de roca en terreno competente.*

Las dimensiones de los tajeos establecidas en el cuadro anterior, no toman en cuenta las condiciones particulares que pudieran estar presentes en la masa rocosa, como la presencia de bloques y cuñas rocosas, el espesor de los estratos, los altos esfuerzos, el agua, la velocidad de minado, ritmo de producción, equipo y personal disponible. Todos estos factores deben ser tomados en cuenta cuando se establezcan las dimensiones finales de los tajeos.

Cuando en la masa rocosa se presenten bloques, cuñas o estratos, se deberá instalar el sostenimiento adecuado para estabilizarlos y cuando se presenten altos esfuerzos y agua, se deberá disminuir el tamaño de las excavaciones, de lo contrario utilizar sostenimiento adecuado.

### **3.3.3 Orientación de las excavaciones**

Para tener mejores condiciones de estabilidad, es recomendable (siempre que sea posible), que la dirección de avance de las excavaciones sea en forma perpendicular al sistema dominante de discontinuidades, es decir, la excavación debe cruzar al sistema principal de discontinuidades, estratos, fallas principales o zonas de corte.



Figura 3.14 Avance favorable de la excavación con relación a las discontinuidades.

Cuando no es posible cruzar al sistema dominante de discontinuidades, como en el caso de estructuras tipo vetas angostas por ejemplo, en donde el avance será necesariamente paralelo al sistema dominante de discontinuidades, se deberá prever el sostenimiento de la excavación, si es que las condiciones de la masa rocosa indicaran la necesidad de sostenimiento.

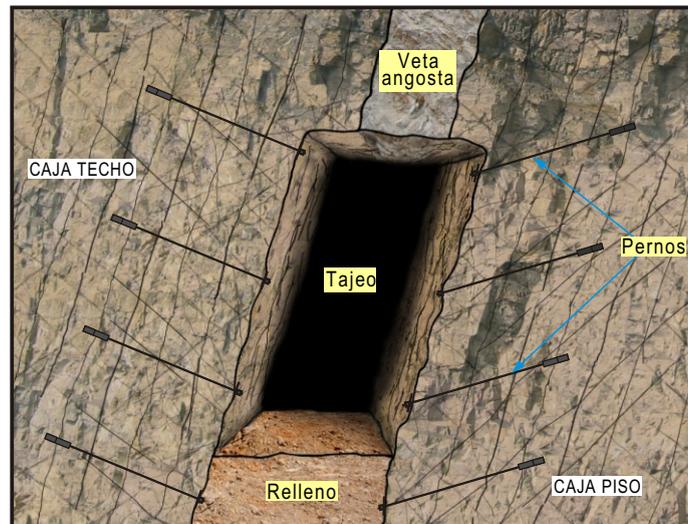


Figura 3.15 Avance paralelo al sistema de discontinuidades. Condición desfavorable.

Cuando en una masa rocosa ocurrieran cuñas biplanares, también en lo posible, el eje de la excavación debería ser alineado perpendicular al rumbo de la cuña. De lo contrario, se tendría que utilizar sostenimiento para estabilizar las cuñas.

Para el caso de labores de avance construidas en zonas de pliegues (anticlinales y sinclinales), las condiciones de estabilidad más favorables se presentarán cuando el avance de las labores sea perpendicular a los ejes de los plegamientos. Se deberá evitar el avance paralelo al eje de los plegamientos, en particular paralelo a los ejes de los sinclinales, debido a las concentraciones de los flujos de agua y de los esfuerzos.

### 3.4 ESQUEMA Y SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO

Por las particularidades que presenten las condiciones geomecánicas de la masa rocosa y las condiciones naturales del yacimiento, este último referido principalmente a la morfología de la mineralización, cada mina tendrá sus propios esquemas y secuencias de avance de las excavaciones, con los cuales se podrán obtener ventajas significativas en la estabilidad de la masa rocosa tanto a escala local como global.

También se indica que los esquemas y secuencias de avance de las excavaciones dependerán del método de minado que se utilice para la explotación del yacimiento. En cada método de minado habrán siempre mejores opciones o estrategias respecto a otras, para que la extracción del mineral proceda en mejores condiciones de estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones.

Desde que los esquemas y secuencias de avance del minado son particulares para cada mina, aquí solo presentamos aspectos generales de los mismos.

#### 3.4.1 El caso de pilares

En el minado subterráneo, no solamente se utilizan pilares asociados al método de explotación por cámaras y pilares, sino que hay muchas otras formas de pilares asociados a otros métodos de minado. También se tienen pilares destinados a proteger al minado adyacente o a excavaciones permanentes como piques, chimeneas u otras instalaciones importantes de la mina.

Para que los pilares tengan mejores condiciones de estabilidad, es necesario establecer el esquema de los mismos, es decir, su sección, altura y orientación, de acuerdo al arreglo estructural de la masa rocosa. En tal sentido se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las condiciones más favorables para la estabilidad, se lograrán si los pilares no son atravesados de pared a pared por los sistemas dominantes de discontinuidades estructurales como diaclasas, estratos, fallas y zonas de corte. De lo contrario, los pilares serán debilitados, constituyendo un problema de falla potencial de la roca.
- Los sistemas de minado deben integrar las fallas y zonas de corte a los pilares, para mantener los techos de los tajeos en roca competente, pero se debe tener cuidado que estas estructuras no atraviesen a los pilares de pared a pared, para lo cual se deben hacer

hacer variar las dimensiones en planta del pilar, a fin de mantener a la falla o zona de corte dentro del pilar.

- En el minado de cámaras y pilares, el esquema de los pilares puede ser planeado para soportar los techos fallados, ubicando a éstos en las áreas de intersección de fallas o zonas de corte.
- Los pilares de rumbo, en particular los pilares largos, deben ser evitados porque son inestables. Una forma de estabilizarlos es agrandando su ancho o inclinando las paredes del pilar de manera normal al buzamiento de la veta o cuerpo.
- Los pilares largos de buzamiento son más atractivos desde el punto de vista de la estabilidad, que los pilares de rumbo.
- Los pilares deben estar apoyados en masas rocosas in-situ, debiendo tener continuidad vertical conforme vayan avanzando los cortes ascendentes de mineral, de lo contrario, si el pilar no tuviera buena base, habrían problemas de inestabilidad tanto en el pilar como en las cámaras.
- En ambientes de altos esfuerzos, no es recomendable disminuir el ancho de los pilares, debido a que el pilar podría fallar.
- Una guía práctica para establecer la altura de los pilares de corona o denominados también pilares puentes, es que en rocas de buena calidad la altura del pilar de corona puede ser menor que el ancho o luz de la excavación, en rocas de regular calidad la altura del pilar de corona puede ser similar al ancho de la excavación y en rocas de mala calidad la altura del pilar de corona debe ser mayor que el ancho de la labor.
- En el caso del minado con tajeos primarios y secundarios, en el cual se recuperan los pilares de mineral, es importante establecer la secuencia de minado que mejor se adapte a las condiciones de estabilidad a escala mina y a escala local.

### **3.4.2 El caso de excavaciones adyacentes**

Las labores mineras que se ubican principalmente en las inmediaciones de los tajeos, están sujetas a intensas perturbaciones por la influencia del avance del minado, particularmente en ambientes de altos esfuerzos y en condiciones de rocas de mala calidad. En lo posible, estas excavaciones no deben ser ubicadas muy próximas a los tajeos o se debe instalar en ellas un sostenimiento adecuado para resistir estas perturbaciones.

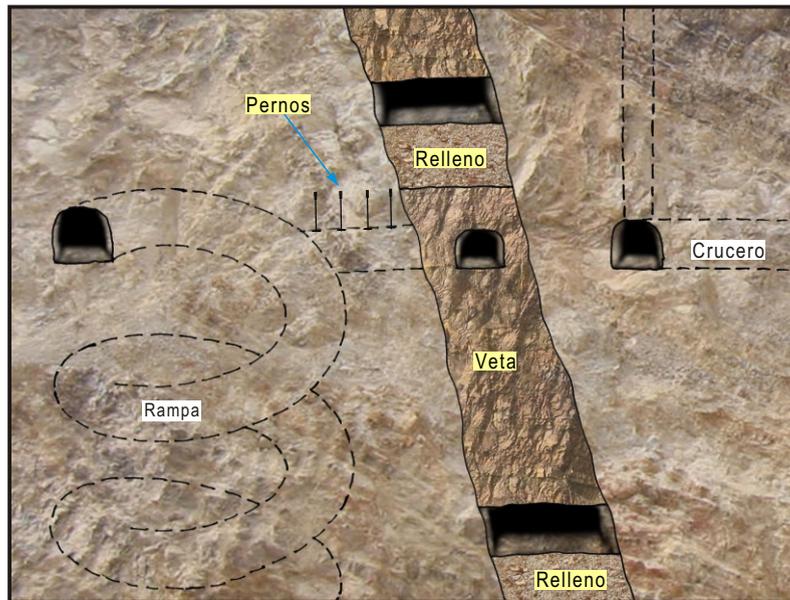


Figura 3.16 Excavaciones adyacentes próximas a tajeos.

### 3.4.3 Minado hacia estructuras principales

Cuando la dirección de avance de una excavación va al encuentro de una estructura principal como una falla, un dique o zona de corte, a medida que va reduciéndose la distancia a la estructura principal, los esfuerzos van concentrándose cada vez más, a punto de que puede ocurrir la falla de la excavación. Es necesario tener en cuenta este hecho para prever la instalación del sostenimiento adecuado.

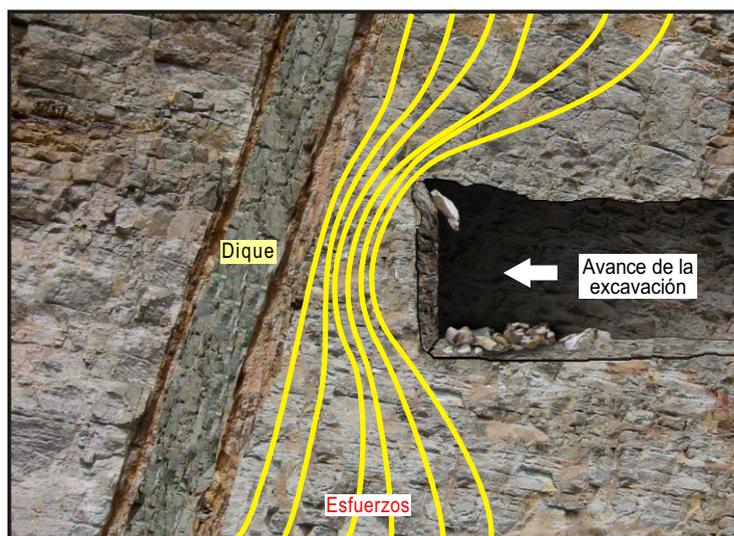


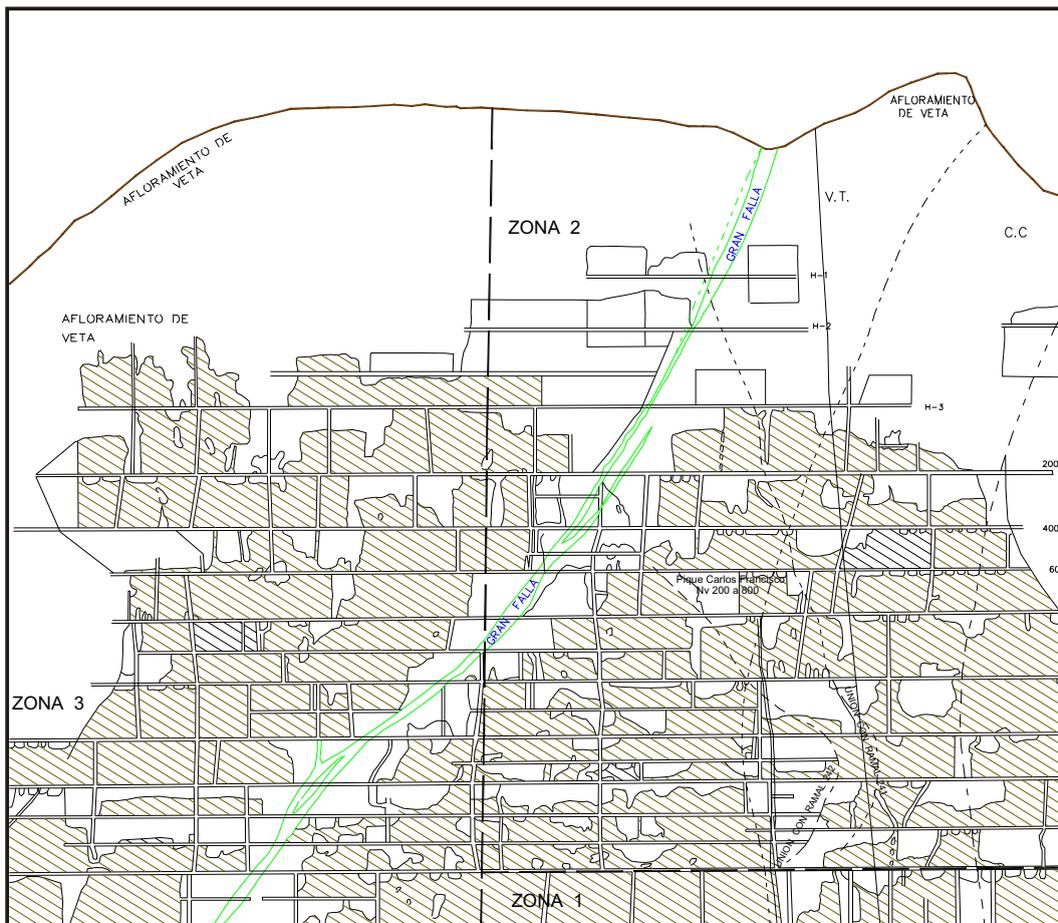
Figura 3.17 Inestabilidad debido al acercamiento hacia una estructura principal.

Cuando en el tajeo se presenta una falla importante o zona de corte, el avance horizontal hacia esta estructura puede conducir a problemas de inestabilidad. Lo recomendable sería cambiar la dirección de avance, es decir, comenzar el minado desde la falla o zona de corte, alejándose de ésta.

Similarmente ocurre, cuando el minado avanza ascendentemente hacia una estructura principal como una falla o zona de corte, en este caso resulta difícil invertir la dirección de avance. La solución sería el sostenimiento de la labor.

Situaciones similares se dan con la presencia de diques, particularmente en ambientes de altos esfuerzos, en donde estas estructuras toman los esfuerzos desde las estructuras circundantes. Las soluciones en este caso serían también las mismas que las indicadas para el caso de presencia de fallas y zonas de corte.

En algunos casos, fallas regionales importantes atraviesan todo el yacimiento, en este caso, lo usual es dejar pilares de protección en los alrededores de las fallas o disminuir el tamaño de las labores mineras en función de la calidad de la masa rocosa o utilizar el sostenimiento adecuado.



**Figura 3.18 Pilares de protección para la Gran Falla.**

### 3.4.4 Minado hacia rocas de diferente calidad

Cuando el minado avanza desde una roca de mala calidad hacia una roca de buena calidad o viceversa, las rocas de buena calidad toman los esfuerzos desarrollados en la roca de mala calidad, pudiendo ocurrir la falla de la excavación. Es necesario, en estos casos, prever la utilización de sostenimiento adecuado.

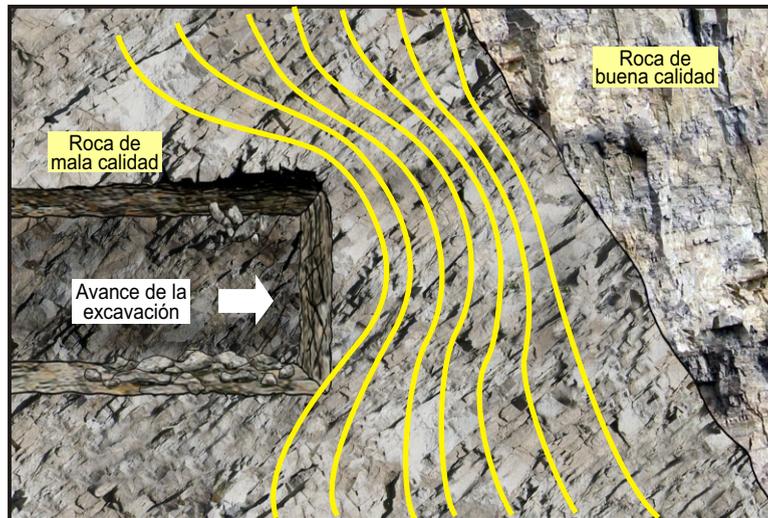


Figura 3.19 Inestabilidad debido al cambio de calidad de masa rocosa.

Otras situaciones de peligro, ocurren cuando están involucradas en la masa rocosa diversas formas de cuñas o cuando la excavación corre paralela a una falla o zona de corte, por lo que es necesario siempre tomar en cuenta la influencia del arreglo estructural de la masa rocosa, a fin de prever las medidas de estabilización.

### 3.4.5 Ubicación de excavaciones permanentes importantes

El progreso del minado va generando perturbaciones de la masa rocosa en sus áreas de influencia. Si estructuras importantes como piques, galerías de nivel, rampas de acceso y otros se ubicaran en las áreas de futura influencia del minado, éstas estarían sujetas a condiciones adversas, que generarían problemas de inestabilidad. Teniendo en cuenta que las mayores perturbaciones por la influencia del minado ocurren en la caja techo del yacimiento, es recomendable que estas excavaciones permanentes sean ubicadas en la caja piso del yacimiento, en masa rocosa sólida que no estará sujeta a perturbaciones por el avance del minado. Solo la presencia de masas rocosas de mala calidad en la caja piso, podrían justificar la ubicación de las excavaciones permanentes en la caja techo.

### 3.4.6 Secuencia de avance, tiempo de exposición de las aberturas y velocidad de minado

El siguiente gráfico relaciona el tiempo de autosostenimiento de una excavación, según el ancho del mismo y la calidad de la masa rocosa.

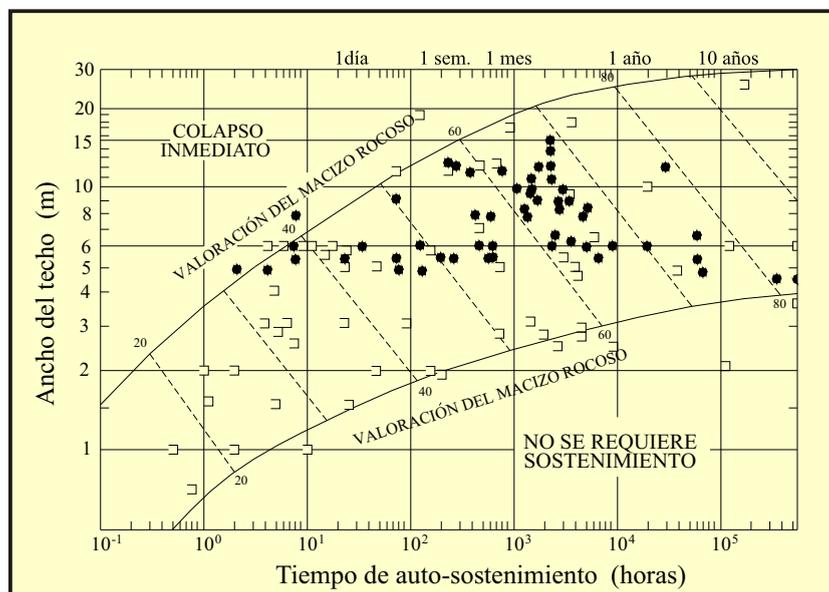


Figura 3.20 Tiempo de autosostenimiento vs Ancho de la excavación para diferentes calidades de masa rocosa, según Bieniawski, 1989.

Aunque la experiencia ha mostrado que este gráfico es un tanto conservador para ser aplicado a tajeos, sin embargo, con ciertos ajustes (producto de las observaciones en cada mina), puede ser adaptado para estimar el tiempo de autosostenimiento de las labores mineras.

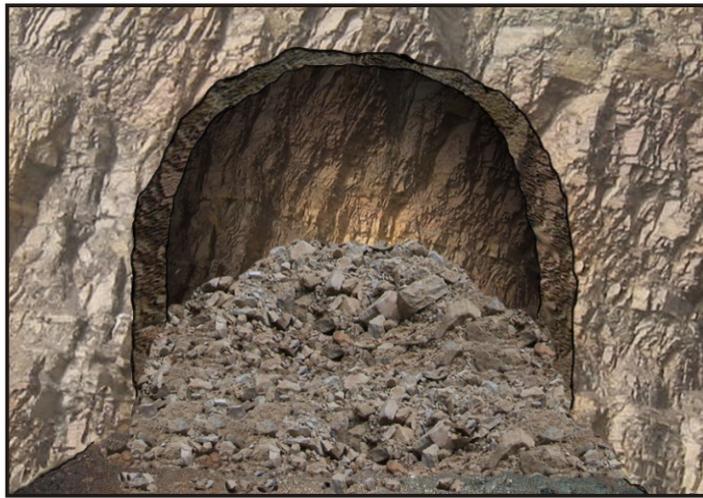
Según el tamaño de la excavación, las rocas de muy buena calidad, pueden permanecer autosostenidas por varios años; las de buena calidad, por varios meses; las de regular calidad, por varios días o pocas semanas; y las de muy mala calidad, solo por pocas horas.

En lo posible, el ciclo de minado, que a su vez depende de la secuencia de avance del mismo, debe ser aparejado al tiempo de autosostenimiento de una labor minera. Si el tiempo de autosostenimiento fuera mayor que el ciclo de minado, ya no habría necesidad de instalar el sostenimiento sistemático, de lo contrario se tendría que sostener la labor.

En rocas de mala calidad, donde el tiempo de autosostenimiento es muy limitado, la velocidad del minado es una variable minera muy importante a ser considerada para controlar la estabilidad de las excavaciones. Cuanto mayor sea la velocidad del minado, menor será la probabilidad de ocurrencias de inestabilidades del terreno.

### 3.5 IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS APROPIADAS DE VOLADURA

La voladura involucra una liberación súbita y controlada de energía y tiene por finalidad romper la roca y crear una forma estable de excavación deseada. Cuando todos los aspectos concernientes a los procesos de la voladura son llevados a cabo exitosamente, la excavación generada mantendrá su forma deseada, la roca fragmentada en pequeñas piezas podrá ser manejada con facilidad por el equipo minero, habrá un buen sistema de flujo de mineral y se producirá mínimo daño en la roca circundante a la excavación.



*Figura 3.21 Buena voladura con mínimo daño a la periferia de la excavación.*

Se debe comprender que tanto la malla de perforación como el alineamiento de los taladros, son aspectos críticos para lograr que los resultados de la voladura sean exitosos.

La malla de perforación permite la descarga de la energía de la voladura de manera controlada. En determinadas situaciones esta malla requiere ser modificada:

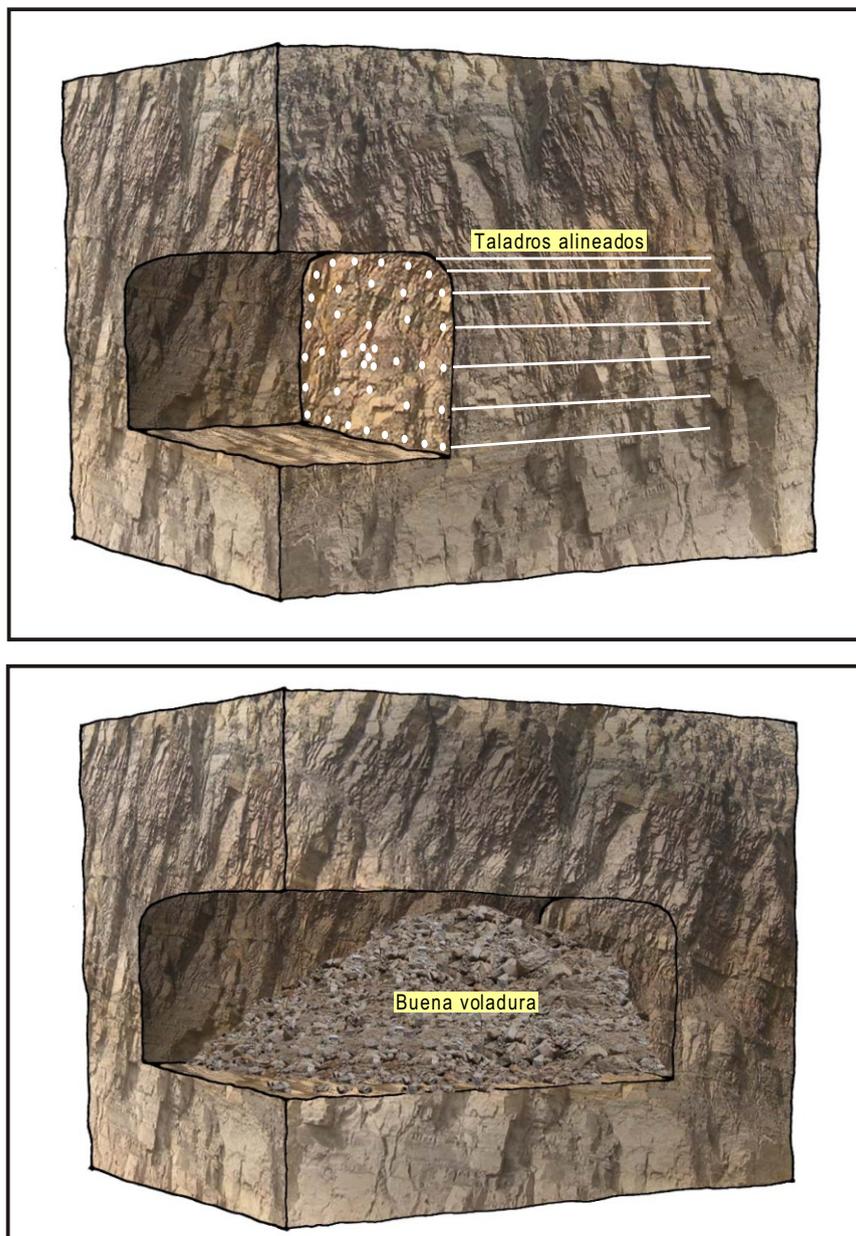


*Figura 3.22 Diseño de malla de perforación.*

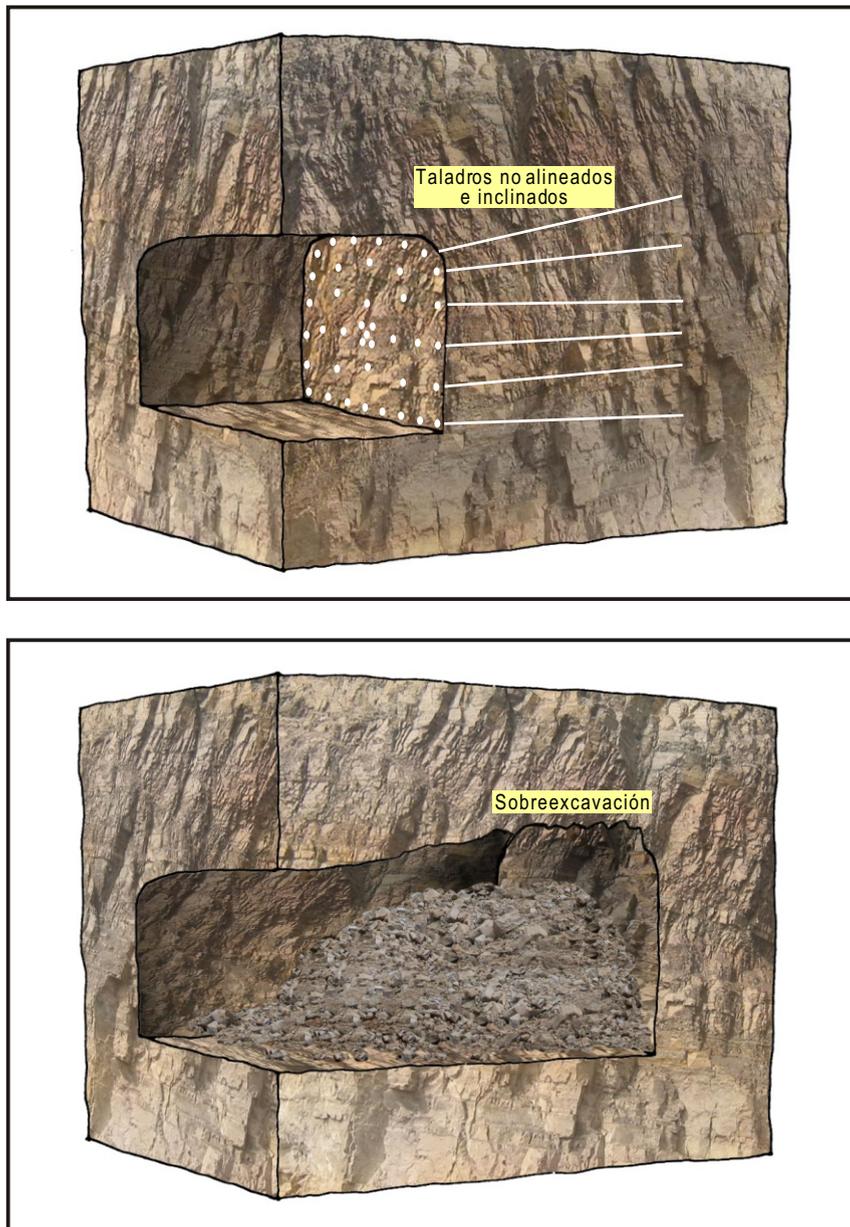
Primero: Por los cambios en las condiciones geomecánicas de la roca, como su resistencia, su arreglo estructural y las características de los esfuerzos.

Segundo: Por la alteración de la energía explosiva, si hay cambios en el diámetro de los taladros o en el tipo de explosivo utilizado.

El alineamiento de los taladros asegura que la forma de la excavación sea estable. Un deficiente alineamiento de los taladros va a crear una malla de perforación inefectiva o deficiente, que va a ocasionar una sobrerotura de la roca generando inestabilidad. Por consiguiente, es importante asegurar que tanto el collar del taladro como el extremo sean correctamente ubicados.



*Figura 3.23 Resultado de una voladura debido a un correcto alineamiento de los taladros.*



**Figura 3.24** Sobreexcavación debido a taladros no alineados.

En algunos casos, particularmente cuando las características de la roca no permiten ubicar en el lugar deseado, los collares de los taladros deben ser cambiados de ubicación, en estos casos es importante que el perforista anticipe la ubicación correcta del extremo del taladro, el cual es más importante para el proceso de la voladura que la ubicación del collar del taladro.

Cuando la malla de perforación sea deficiente, se deben tomar las medidas correctivas, a fin de continuar con el proceso de minado en forma eficaz.

Si la secuencia de la voladura no fuera debidamente ordenada, si hubiera taladros abortados o si el alineamiento de los taladros fuera erróneo, la voladura podría ocasionar lo siguiente:

1. Daños más allá del perímetro de la excavación deseada.
2. Fragmentación inadecuada con bloques grandes que difícilmente se podrían manipular.
3. Formas irregulares de los contornos de la excavación, propensas al fallamiento y caída de rocas.



*Figura 3.25*  
*Daños más allá del perímetro de la excavación.*



*Figura 3.26*  
*Fragmentación inadecuada.*



*Figura 3.27*  
*Formas irregulares de los contornos de la excavación.*

Hoy en día, la fabricación de los explosivos que se utilizan en la industria minera, son efectuados siguiendo altos estándares. Aunque en determinadas situaciones se usen explosivos especiales y la selección del tipo de explosivo sea el adecuado, sin embargo, las variaciones en las prácticas de ubicación y carga, son los aspectos más críticos en el proceso de voladura. Los taladros debidamente ubicados y cargados, asegurarán un mayor control sobre la voladura que finalmente reducirán el daño más allá del perímetro de la excavación, resultando en una disminución de los problemas de inestabilidad en la masa rocosa de las excavaciones.

Los estudios hechos en prácticas exitosas de voladura, han mostrado que las consideraciones a tenerse en cuenta en las voladuras, en orden de importancia son:

1. El alineamiento de los taladros perforados
2. La malla de perforación
3. La secuencia de la descarga de energía
4. El explosivo seleccionado para la voladura

### **3.6 PRÁCTICAS CORRECTAS DE DESATADO**

De todos los accidentes fatales que ocurren en las minas subterráneas del Perú, en promedio el 40 % son causados por caída de rocas. De este porcentaje, aproximadamente el 80 % de los daños por caída de rocas, ocurrieron mientras el trabajador se encontraba desatando o por desatado inadecuado. Este hecho es el principal motivo para la elaboración de este manual.

Si todos los trabajadores de las minas subterráneas del Perú utilizaran estándares y procedimientos apropiados para el desatado de la roca suelta, se reduciría drásticamente los accidentes por caída de rocas.

Por la importancia de este tema, se ha elaborado como parte de este manual un acápite especial de Desatado de Rocas, el cual viene anexo a este manual.

## 3.7 SOSTENIMIENTO CON ESTRUCTURAS NATURALES Y ARTIFICIALES

El sostenimiento, es un término ampliamente utilizado para describir los procedimientos y materiales aplicados a mejorar la estabilidad y mantener la capacidad portante de la roca circundante a la excavación.

El objetivo principal de un sistema de sostenimiento es movilizar y conservar la resistencia inherente de la masa rocosa, de tal manera que la excavación pueda autosostenerse.

En el caso del minado subterráneo, se pueden utilizar para el sostenimiento de las labores mineras, estructuras naturales y estructuras artificiales, tal como se describe a continuación.

### 3.7.1 Estructuras naturales

Están referidas a la utilización de la misma masa rocosa para crear estructuras que ayuden a mejorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones. Entre ellas tenemos el efecto arco en los contornos de la excavación, las diferentes formas de pilares y los escudos.

#### 3.7.1.1 El efecto arco

El arqueado de los contornos de las excavaciones, principalmente en el techo, favorece las condiciones de estabilidad de las labores mineras subterráneas, minimizando la necesidad de utilizar sostenimiento con estructuras artificiales.

Sin embargo, cuando la masa rocosa presenta rasgos estructurales con condiciones para formar bloques o cuñas potencialmente inestables, es recomendable acomodarse al arreglo estructural de la masa rocosa, particularmente en el techo. Se malogrará la estética de la excavación, pero esto significará un trabajo seguro.

#### 3.7.1.2 Los pilares

Las diferentes formas de pilares, como las mencionadas en los acápite anteriores son utilizadas como estructuras naturales, para sostener a la masa rocosa circundante a las excavaciones asociadas al minado subterráneo. En la Figura 3.28 se muestra un ejemplo de sostenimiento con pilares de techos fallados, asociado al minado por cámaras y pilares. En este caso, los pilares están ubicados en áreas de intersección de fallas.

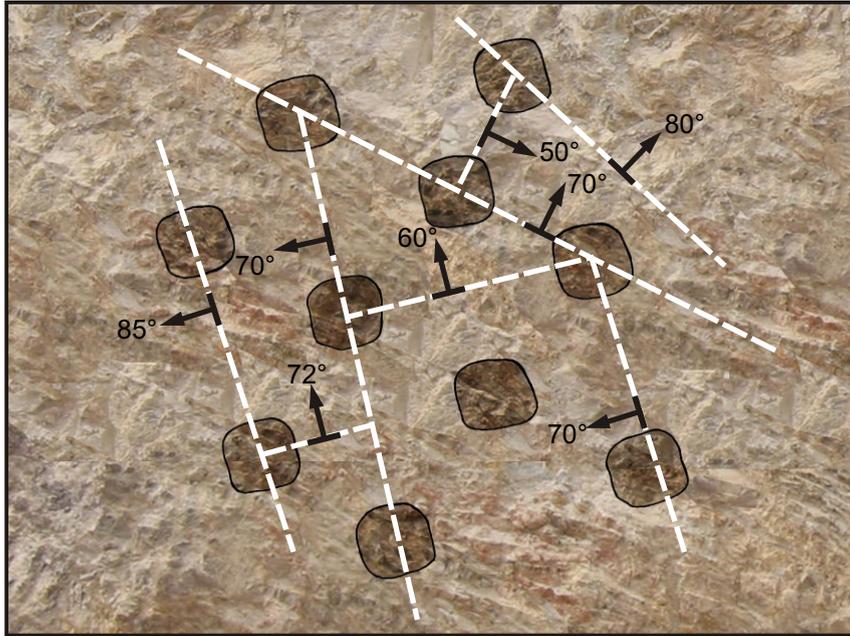


Figura 3.28 Esquema de pilares en terrenos fallados.

### 3.7.1.3 Los escudos

Esta estructura natural consiste en dejar una capa de mineral en los hastiales del tajeo, principalmente en la caja techo, en situaciones donde las rocas encajonantes son de mala calidad y el mineral es de mejor calidad. Esta capa de mineral de 0.5 a 1 m de espesor, funciona como sostenimiento de la roca de mala calidad de las cajas, recomendándose que tenga continuidad en todo el hastial. Si por alguna razón se extrae parte del mineral de los escudos, estos pierden su efectividad y provocan situaciones de peligro.

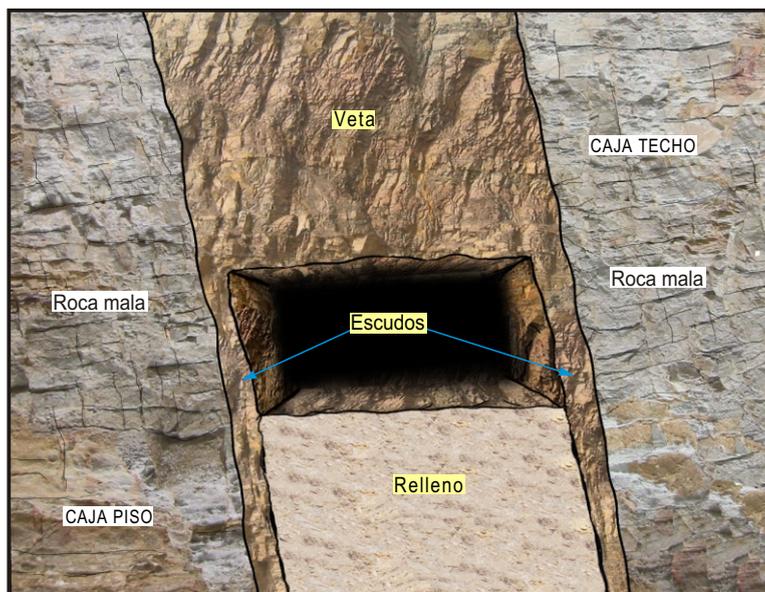


Figura 3.29 Estabilidad de los hastiales debido a los escudos.

### 3.7.2 Estructuras artificiales

Entre las estructuras artificiales debemos distinguir el reforzamiento de la roca o también denominado sostenimiento activo y el soporte de la roca o también denominado sostenimiento pasivo. En el reforzamiento de la roca, los elementos de sostenimiento son una parte integrante de la masa rocosa reforzada. En el soporte de la roca, los elementos de sostenimiento son externos a la roca y responden a las deformaciones de la masa rocosa circundante a la excavación, hacia el interior de la misma.

Un buen ejemplo de sostenimiento activo son los pernos de varilla corrugada cementados o con resina (instalados sistemáticamente), los cuales se tensan cuando la masa rocosa se deforma, interactuando con la roca de manera similar como lo hace el refuerzo de acero con el concreto en obras de ingeniería civil.

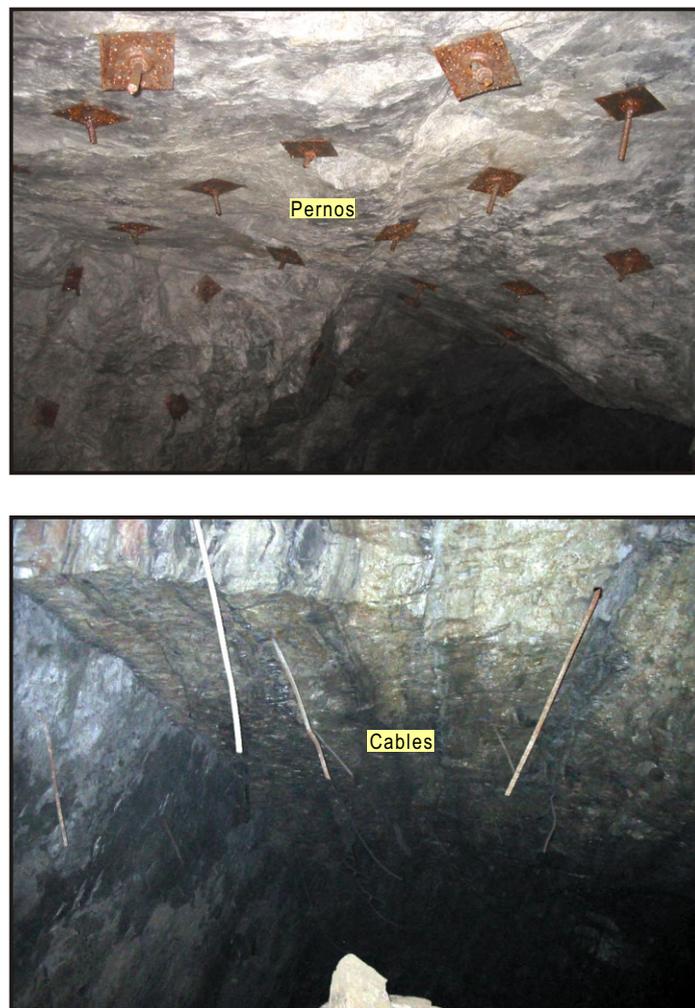


Figura 3.30 Sostenimiento activo, caso pernos y cables.

Un ejemplo de sostenimiento pasivo son las cimbras de acero, en tanto que son externos a la masa rocosa y solo responden al movimiento progresivo de la masa rocosa aflojada, hacia el interior de la excavación. Similarmente ocurre en el sostenimiento con madera.



*Figura 3.31 Sostenimientos pasivos.*

El sostenimiento de las labores mineras subterráneas generalmente combina los efectos del **reforzamiento** de la roca, con elementos tales como pernos de roca y cables y el **soporte**, con elementos tales como el concreto lanzado (shotcrete), malla metálica, cintas de acero (straps) y cimbras de acero.

Debemos señalar además que en nuestro medio, la madera en sus diferentes formas de utilización constituye otro elemento de sostenimiento (soporte); asimismo, los diferentes tipos de relleno de tajeos, particularmente el relleno cementado.

Es muy importante tomar en cuenta que la instalación de refuerzo y soporte de la roca, debe llevarse a cabo como parte integrante del ciclo de excavación, para incrementar el autosostenimiento de la masa rocosa circundante a la excavación.

Por la importancia que tiene el sostenimiento para el control de la estabilidad de la masa rocosa circundante a las excavaciones, se ha dedicado un capítulo especial en este manual para este tema (Capítulo 4). En este capítulo se tratan diversos aspectos relacionados a cada uno de los siguientes elementos de sostenimiento: pernos de roca (de anclaje mecánico, de varillas de fierro corrugado o barras helicoidales, ancladas con cemento o con resina, split sets y swellex), cables, malla, cintas de acero (straps), concreto lanzado (shotcrete) simple y con refuerzo de fibras de acero, cimbras de acero, gatas, madera (puntales, paquetes, cuadros, conjunto de cuadros), relleno y algunas otras técnicas especiales de estabilización de la masa rocosa.

### 3.8 CONTROLES INSTRUMENTALES DE LA ESTABILIDAD

En la actualidad, existe una cantidad impresionante de técnicas para el control instrumental en la construcción de excavaciones subterráneas en general. No se pretende aquí cubrir todo este tema, sino proporcionar algunos aspectos que pueden ser de utilidad práctica en el control de la estabilidad del minado subterráneo.

El mejor método de controlar la estabilidad de una labor minera es la inspección visual continua de las superficies de la excavación por parte del personal de la mina, según esto, los trabajos para mantener o restablecer condiciones seguras alrededor de una excavación, variarán desde el correcto desatajo hasta la colocación de sostenimiento adecuado y éstos deben ser llevados a cabo permanentemente.

En situaciones especiales puede ser útil realizar mediciones de los desplazamientos del terreno, para lo cual se pueden emplear instrumentos sencillos, sólidos y confiables, como por ejemplo un extensómetro de cinta (tape extensometer) para mediciones de convergencia, es decir para medir las deformaciones de los contornos de una excavación, como se ilustra en la figura adjunta.



Figura 3.32 Control de la estabilidad usando equipos de instrumentación.

Otra instrumentación podrían ser los controles topográficos con equipos de estación total para medir el desplazamiento de puntos de referencia, asociados a problemas de inestabilidad de la masa rocosa por efectos del minado, ya sea ubicados en subterráneo o en el terreno de superficie.

También podría ser útil disponer de un sismógrafo para controlar las vibraciones del terreno por efecto de la voladura, con el fin de evaluar los daños a la masa rocosa de las excavaciones o mejorar las técnicas de voladura.

Finalmente, siendo los pernos de roca uno de los sistemas de sostenimiento más utilizados en el minado subterráneo, sería útil disponer de un ensayador de pernos de roca (rock bolt tester), a fin de controlar la efectividad de este sistema de sostenimiento.