

CAPITULO IV

4.- COMPORTAMIENTO DE LA LABOR MINERA

Para analizar el comportamiento de una labor minera, se debe tener en cuenta el **sistema de control instrumental (monitoreo) de los componentes estructurales rocosos** de dicha labor minera superficial y/o subterránea (rampa, banco, galería, crucero, tajeo, entre otras) con una diversidad y/o gama de equipos e instrumentos mecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos.

4.1.- ANTES DE LA CONSTRUCCIÓN

Para recabar la información que se necesita para el diseño de la ejecución de la labor minera. Esta información incluye el modulo de deformación de la roca, la resistencia de la roca in-situ y el estado de los esfuerzos in-situ.

4.2.- DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Para confirmar la idoneidad del diseño y para proporcionar las bases necesarias para su cambio. Además el control de los desplazamientos tiene un papel importante en la información que se necesita para aumentar la seguridad en las labores mineras superficiales y subterráneas.

4.3.- DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN

Para controlar el comportamiento general de la labor minera durante la operación o para medir la reacción de una operación minera adyacente a otra más cercana.

Un programa sobre el sistema de instrumentación superficial y/o subterránea deberá enfrentarse a estas fases en una forma mas eficiente y económica que sea posible. No se deberán sobreestimar las fases de sencillez, solidez y confiabilidad ya que los instrumentos a emplearse en labores mineras se someterán a condiciones muy rudas de temperatura, de humedad y de manejo.

4.4.- CONTROL INSTRUMENTAL

El monitoreo es la observación del comportamiento de las estructuras, ya sea visualmente o con la ayuda de instrumentos. Dentro del contexto geomecánico, el control instrumental puede llevarse a cabo por las siguientes razones:

A.- Para el registro de los valores naturales y variaciones en los parámetros

geotécnicos tales como el nivel freático, nivel de agua y eventos sísmicos antes del inicio de la puesta en marcha de un proyecto.

- B.-** Para garantizar la seguridad durante la construcción y operación por ejemplo: Mediante la advertencia del desarrollo del exceso de deformaciones en el terreno, presiones de agua y carga de los elementos de soporte.
- C.-** Para verificar la validez de las suposiciones, modelos conceptuales y los valores del suelo o las propiedades del macizo rocoso, usados en los cálculos para el diseño.
- D.-** Para el control de la implementación del tratamiento del terreno y remediar trabajos tales como glaciares durante la profundización de piques, túneles y tajos (bancos) a través de la napa freática, enlechado, drenaje o la provisión de soporte mediante el tensionado de cables.

En la Mecánica de rocas la mayor parte del control instrumental se lleva a cabo por la segunda y tercera de las razones anteriormente mencionadas. Es importante llevar a cabo un control instrumental de la seguridad y para controlar el comportamiento del macizo rocoso y como consecuencia de ello hacer los ajustes en el diseño global de la operación minera y tomar las medidas apropiadas.

Las masas rocosas son extremadamente complejas y cuyas propiedades son difíciles por no decir imposibles de predeterminar con exactitud los frentes de operación. También quedara claro que los modelos usados para predecir los variados aspectos del comportamiento del macizo rocoso para los diferentes tipos de minado, están basados sobre idealizaciones, suposiciones y simplificaciones: por esto es vitalmente necesario comprobar la posición de las predicciones hechas en los cálculos para el diseño.

El uso del sistema de monitoreo en las operaciones mineras superficiales y subterráneas modernas y de gran escala pueden ser sofisticadas y caras. Sin embargo, debe recordarse que conclusiones valiosas acerca del comportamiento del macizo rocoso a menudo puede obtenerse de operaciones visuales y de las observaciones hechas usando aparatos de monitoreo muy simples. Los detalles que pueden ser monitoreados en las operaciones mineras superficiales y subterráneas son:

- * Desplazamiento de la roca en los límites del tajo y/o excavación.
- * Movimiento a lo largo o a través de una diaclasa.
- * Desplazamientos relativos a la convergencia de puntos de anclaje de referencia en los límites de una excavación.
- * Desplazamientos ocurridos en el macizo rocoso lejos de la periferia de la labor minera.
- * Desplazamientos superficiales y/o de subsidencia.
- * Cambios en la inclinación de un taladro.

- * Niveles de agua subterránea.
- * Cambios en el esfuerzo en un punto en la masa rocosa.
- * Cambios en las cargas y en los elementos de sostenimiento, tales como de refuerzo, soporte, revestimiento y relleno.
- * Los esfuerzos y las presiones de agua generadas en el terreno.
- * Sedimentación del terreno.
- * Emisiones sísmicas y microcósmicas.
- * Velocidad de propagación de las ondas.

Aunque pueda parecer que en la relación hay una gran cantidad de variables que pueden ser monitoreadas, solo el desplazamiento y la presión pueden ser medidas relativamente y directamente usando tecnología simple. Las mediciones pueden realizarse de desplazamientos absolutos de una serie de puntos en los límites de la labor minera o con una mayor dificultad dentro del macizo rocoso.

El desplazamiento relativo o de convergencia de dos puntos en los límites de una excavación es más fácil de medir que el desplazamiento absoluto. Debido a que el desplazamiento relativo de dos puntos puede medirse comúnmente y puede obtenerse una medida de deformación normal asumiendo que la perforación es uniforme sobre la longitud referencial considerada. Las presiones de agua subterránea y los esfuerzos normales en el contacto de los elementos de sostenimiento del macizo rocoso o con el relleno pueden medirse mediante presiones inducidas en celdas de presión rellenas con fluido.

Es importante reconocer que la medición de muchas otras variables de interés, especialmente fuerzas y esfuerzos, requieren del uso de modelos matemáticos y de las propiedades del material para calcular los valores requeridos de los desplazamientos, deformaciones o presiones.

4.5.- SISTEMAS DE MONITOREO

4.5.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO

El sistema de instrumentación usado para monitorear una variable tendrá generalmente tres componentes diferentes:

Un sensor o detector que registra los cambios dentro de la variable que se está monitoreando.

Un sistema de transmisión, el cual puede usar barras, cables electrónicos, líneas hidráulicas o aparatos radiotelemétricos que transmite al sensor como datos de salida de los detalles ubicados.

Y un sistema de lectura y/o unidad de registro tales como un calibrador de dial, indicador de presión, registrador de cinta magnética o del tipo digital que convierte los datos en usables y lo presenta al especialista.

- A.-** De fácil instalación, si es necesario bajo condiciones adversas.
- B.-** Adecuada sensibilidad, precisión y reproducción de las mediciones.
- C.-** Protección adecuada y duradera para asegurar la durabilidad en los periodos de operación requeridas.
- D.-** De fácil lectura y de disponibilidad inmediata de los datos para el ingeniero.
- E.-** Que no interfiera con las operaciones mineras.

4.5.2.- COMPONENTES SENSORES Y/O DETECTORES

Son elementos que constituyen un sistema de control instrumental, se caracteriza por ser los elementos que detectan las variaciones, desplazamientos, movimientos, deformaciones, entre otros, que se registran para un control instrumental, dependiendo del tipo de control instrumental (monitoreo). En el mercado existe una gran variedad de sensores y/o detectores y con diferentes ángulos de precisión, estos componentes van conectados a los otros componentes de transmisión y lectura.

Por ejemplo en el caso de extensómetros de varillas el elemento sensor y/o detector serian los anclajes, barras cilíndricas de acero estriadas en el caso del extensómetro de cinta el elemento sensor y/o detector seria el fierro corrugado con su perno de ojillo, anclado en el punto donde se registran las mediciones.

4.5.3.- COMPONENTES TRANSMISORES

Son elementos que forman parte de un sistema de control instrumental, se caracterizan por ser los elementos que transmiten las variaciones, desplazamientos y movimientos que los elementos sensores y/o detectores han registrado durante un control instrumental (monitoreo); estos componentes van conectados a los componentes de la lectura, por ejemplo:

En el caso de la barra telescópica Extensométrica, el elemento transmisor es la barra de aluminio tabular que hace contacto (hemisférico) en cada extremo, con dos puntos a medirse.

En el caso del extensómetro de varillas los elementos transmisores son las varillas de acero de $\frac{1}{4}$ " de diámetro forrados con tubos PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro.

4.5.4.- COMPONENTES DE LECTURA

Son elementos que forman parte de un sistema de control instrumental, se caracterizan, por ser los elementos donde se efectúa la lectura de las variaciones, desplazamientos, movimientos registrados por los elementos sensores y/o detectores y transmitidas hacia los componentes de lectura por los elementos transmisores durante el control instrumental (monitoreo), en el mercado existe una variedad o gama de elementos de lectura con diferentes rangos de precisión, como son: eléctricos, ópticos, mecánicos, entre otros, por ejemplo:

El sistema de control instrumental (óptico), el instrumental de estación total esta compuesta por un teodolito electrónico y un distanciómetro.

En el caso de la barra telescópica extensométrica, el equipo constituido por dos barras: una fija colocada en un punto de referencia y otra móvil colocada en el otro punto de referencia, son ajustadas mediante un pin de oreja, indicando en un dispositivo de lectura del desplazamiento entre ambos puntos.

4.6.- MODOS DE OPERACIÓN

Las formas de operación de los sensores, transmisores y sistemas de lectura, usados como aparatos de monitoreo pueden ser mecánicos, ópticos, hidráulicos y eléctricos.

Los sistemas mecánicos miden las variaciones dimensionales de secciones transversales de labores mineras superficiales y/o subterráneas o de las deformaciones en profundidad del macizo rocoso. A menudo resultan los métodos más sencillos, baratos y confiables de detección, transmisión y lectura a distancia o un grabado continuo de los datos que se están tomando.

Los sistemas ópticos se usan en métodos de mediciones convencionales, precisas y fotogramétricas, para el establecimiento de perfiles de excavación y para el registro de fracturas naturales o inducidas para la operación minera.

En el pasado se le dio un uso considerable a los conectores fotoelásticos y discos para monitores, cambios de esfuerzos en los alrededores de las labores mineras y en los elementos de sostenimiento. Quizás el elemento más común que continúa como instrumento de este tipo es la celda de carga de pernos de roca fotoelástica. En esta celda, la carga del perno de roca es transmitida a los diámetros de los discos de vidrio montados entre los platos de cargas de acero.

Los diámetros transductores hidráulicos y neumáticos se usan para medir presiones de agua, soportes de carga, cargas de cable de anclaje, componente normales de esfuerzos y subsidencias. En todos los casos el método de operación es el mismo. La cantidad medida es la presión de un fluido el cual actúa en un lado un diagrama flexible, hecho de metal, jébe o plástico.

La toma de lecturas de aire, nitrógeno o presiones de aceite hidráulico se efectúa en la unidad de lectura a través de uno de los tubos del diafragma.

Estos métodos son usados ampliamente en el monitoreo de superficies de subsidencia asociados con la operación minera.

Los equipos eléctricos probablemente son la base de los instrumentos usados en el presente para monitorear la performance del entorno de la masa rocosa de las estructuras del minado, aunque los sistemas mecánicos siguen siendo utilizados en el monitoreo de los desplazamientos. Los sistemas eléctricos operan generalmente con uno a tres básicos.

Las deformaciones registradas por los equipos y/o aparatos son medidas por captadores eléctricos. Estas pueden ser efectuadas a distancia y centralizadas en las salas o zonas de lectura fijas.

La mayor parte de las celdas de carga, transductores de presión y algunos tipos de inclinómetros, usan medidores de deformación de resistencia eléctrica. Las principales desventajas en el uso de medidores de deformación de resistencia eléctrica son:

- A.- Es difícil obtener una buena adherencia entre el medidor de deformación y la roca.
- B.- Las deformaciones son medidas sobre las longitudes relativamente cortas.
- C.- Los efectos de la temperatura no solo pueden eliminarse.

4.7.- FASES DE APLICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

4.7.1.- CONTROL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LABORES MINERAS

Las mediciones que se efectúan durante la construcción deberán proporcionar la información necesaria para verificar la validez del diseño o permitir la culminación del trabajo en curso. Además esas mediciones deberán proporcionar anticipos sobre los problemas potenciales para que se puedan tomar medidas correctivas antes de que estas se hayan manifestado a tal punto que las medidas correctivas resulten muy caras e imposibles de ejecutar.

Al estudiarse el uso de instrumentos, se ha insistido que estos sean resistentes y sencillos, y que su instalación y control afecte lo menos posible al trabajo de construcción de una labor minera superficial y/o subterránea. Existen varios métodos para el control de desplazamientos, como muchas veces se han intentado llevar el registro de los controles durante la construcción y/o ejecución de la operación minera, pero o siempre no es un trabajo tan sencillo como parece. La mayoría de los instrumentos de medición son de un material plástico y se fijan a la roca con un cementante de resina. Estos materiales

sintéticos tienden a deformarse con el tiempo, por lo que los instrumentos son más adecuados a corto que a largo plazo.

4.7.2.- CONTROL DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN

Una vez finalizada la construcción de una labor minera, será necesario algunas veces controlar su comportamiento. Las técnicas de control son idénticas a las del control durante la construcción de labores mineras. Sobre todo en lo que se refiere a labores mineras subterráneas donde se utiliza el control instrumental de convergencia por la estabilidad a largo plazo que ofrecen estos instrumentos.

En labores mineras de explotación subterránea donde se utilizan grandes cámaras el control de la construcción de estas puede ser importante, sobre todo cuando hay en superficie instalaciones en las inmediaciones de la excavación. También se utilizan técnicas precisas de topografía, las cuales dan una buena indicación sobre el desarrollo de la cámara. En otros casos se pueden construir indicadores mediante el anclaje de una serie de alambres en superficie, para controlar la estabilidad de los taludes (deslizamientos). Los alambres salen del taladro, pasan por poleas, las que están tensadas con pesas. El movimiento de las pesas indican el movimiento de las anclas en el macizo rocoso.

4.8.- ESQUEMA DE CONTROL INSTRUMENTAL (MONITOREO)

El establecimiento de un esquema instrumental debe responder a diversos aspectos que se enumeran a continuación:

- * La naturaleza y características del macizo rocosa(características lito-estructurales).
- * La calidad del macizo rocoso.
- * Los dominios estructurales.
- * Naturaleza y métodos de explotación a emplearse.
- * Forma y dimensiones de la explotación y de la labor minera.
- * Condiciones y fases de la ejecución de la labor minera.
- * Importancia y duración de la labor minera.
- * Los esfuerzos debidos a las condiciones del método de explotación o uso de la labor minera.

4.9.- FACTORES

Todas las posibilidades de investigar el efecto sobre la estabilidad y el comportamiento del macizo rocoso para la aplicación de un método de explotación, de los factores como el método de porcentajes de extracción, la geometría de las labores mineras empleadas, el dimensionamiento de las labores mineras (rampas, galerías, bancos, escombreras, chimeneas, etc),

además de las variaciones geológicas del medio representan una gran economía y rentabilidad en el diseño e instalación de un sistema de control instrumental (monitoreo) con el fin de dar seguridad a las labores ejecutadas.

Como es obvio, en un caso particular exige siempre un estudio específico basado en una investigación "In-situ". El propósito primario de la investigación "in-situ" es de determinar hasta que punto afecta o puede afectar a la explotación del depósito y/o yacimiento minero y viceversa. Los límites del equilibrio y los coeficientes de seguridad resultan necesariamente del conocimiento y de la importancia del medio-explotación.

Para elaborar el presente trabajo técnico se ha considerado lo siguiente:

- A.-** El reconocimiento de la validez de las técnicas y/o procedimientos de monitoreo en minería, no solamente como base de todo el control de seguridad, sino como una imperiosa necesidad de protección del recurso humano.
- B.-** Aportación de varias ciencias, como la Geotecnia, Mecánica de Rocas y de Suelos, y ramas afines.
- C.-** La experiencia obtenida en trabajos de diseño de sistemas de control instrumental (monitoreo) en labores subterráneas y superficiales.
- D.-** La especialización en el procedimiento de la operatividad de los equipos y/o instrumentos ópticos, eléctricos, electrónicos, mecánicos, etc. Que permitan cuantificar con mayor precisión parámetros y magnitudes que afectan o pueden afectar.

4.10. CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se detalla esquemáticamente las consideraciones generales para el estudio

4.10.1.- ESTUDIO DEL MEDIO

Geometría y propiedades: Muestra representativa de la roca intacta, macizo rocoso, disyunción de la masa rocosa, defectos en la roca o en la masa rocosa.

4.10.2.- ESTUDIO DEL CAMPO Y SU CAMBIO EN EL TIEMPO

- * Tensiones internas – compresión natural.
- * Deformaciones y tensiones que son originadas debidas a cargas impuestas.
- * Filtración y presiones intersticiales.
- * Temperatura.
- * Elasticidad.
- * Comportamiento reologico.
- * Rotura.

4.10.3.- MASA ROCOSA

- * Tipos de rocas, composición, clasificaciones.
- * Petrografía, estructura interna, porosidad, fisuras tectónicas.
- * Estratificación y esquistocidad.
- * Anisotropías, discontinuidades, heterogeneidades, zonas alteradas y descomprimidas.

4.10.4.- TENSIONES INTERNAS

- * Efectos del peso.
- * Tensiones tectónicas residuales.
- * Expansión de la masa rocosa en zonas profundas.
- * Influencia en las tensiones internas de fallas, plegamientos, zonas de alteración, etc.
- * Estado de cierre de fallas, diaclasas, reología de las masas rocosas, anisotropía, sobrecarga y rotura de revestimiento y soportes, etc.

4.10.5.- DEFORMACIONES DE LA MASA ROCOSA

- * Relación esfuerzo - deformación, efectos del tiempo, temperatura, presiones intersticiales.
- * Ciclo de carga y descarga asentamientos, colapsos, hundimiento, cierre de diaclasas, inelasticidad, endurecimiento, consolidación, dilatación, fluencia.
- * Ensayos de carga “In-situ”.

- * Estudios geofísicos de deformación.

4.10.6.- FILTRACIONES Y PRESIONES INSTERTICIALES

- * Definición del medio poroso y del régimen de filtración.
- * Coeficiente de permeabilidad.
- * Efectos del estado tensional en la filtración.
- * Tensiones efectivas y tensiones neutras.
- * Percolación.

35

4.10.7.- ROTURA

- * Rotura de los materiales.
- * Estabilidad de vertientes, laderas, túneles, galerías, pilares, escombreras, bancos, tajos, chimeneas, cimentaciones, diques, superficies, frentes de explotación, etc.
- * Deslizamientos, asentamientos, hundimientos, colapsos, etc.

4.10.8.- TRABAJOS EN MINERIA

- * Sistemas de perforación.
- * Desmonte, transporte y depósito.
- * Escombreras.
- * Voladuras (Cálculos, efectos, etc.).
- * Materiales de refuerzo, soporte, revestimiento, grouting, relleno.
- * Tratamiento del macizo rocoso y de los suelos.
- * Anclaje y pretensado.
- * Muros y obras de soporte, retención y contención.
- * Maquinas, equipos, instrumentos, motores, etc. Su influencia en el medio.

Algunos de los instrumentos utilizados para el monitoreo o control, trabajan con el fin de aportar la más exacta información para el mismo modo llegar a la mejor solución.

Las mediciones en un control instrumental (monitoreo) deben ser tomadas con bastante cuidado para obtener un alto porcentaje de confiabilidad (o credibilidad) en los análisis de los datos.

4.11.- INSTRUMENTACIÓN

A continuación se describe una relación de aparatos, equipos y/o instrumentos más utilizados en el control instrumental (monitoreo).

4.11.1.- MEDIDAS DE CARGA

- * Ensayos en galería con el fin de conocer su estabilidad y permeabilidad de la roca.

4.11.2.- ESFUERZO – DEFORMACIÓN

Estas mediciones se realizan por medio de equipos y/o instrumentos:

- * Células de presión.
- * Equipos de cuerda vibrante.
- * Cintas extensométricas.

36

4.11.3.- PRESION INSTERTICIAL Y TENSIONES DEBIDAS A LA HUMEDAD DEL SUELO

- * Piezómetros eléctricos.
- * Piezómetros neumáticos.

4.11.4.- PRESION DE TIERRA, PRESION DINAMICA, TENSIÓN NORMAL Y DE CORTE Y ESTADO DE TENSIONES EN MASAS DE ROCA O DE SUELO

- * Células de presión eléctricas.
- * Células de presión Hidráulicas.
- * Extensómetros.

4.11.5.- MOVIMIENTOS SUBTERRÁNEOS

- * Métodos convencionales.
- * Triangulación.
- * Rayos láser.
- * Fotogrametría.
- * Cintas extensométricas.
- * Extensómetros simples, múltiples y de rodillos.
- * Inclínómetros.
- * Aparatos de hilo tensionado (hilo invar).

4.11.6.- MOVIMIENTOS SUPERFICIALES

- * Métodos convencionales
- * Triangulación
- * Rayos láser
- * Cintas extensométricas
- * Extensómetros simples, múltiples y de rodillos.
- * Inclínómetros.