

GALERIAS MINERAS

La modelización analítica como una ayuda Geomecánica para el diseño minero

ALVARO CORREA ARROYAVE

Ingeniero de Minas y Metalurgia. Doctor-Ingeniero, Grenoble, Francia. Profesor Post-Grado Geotecnia. Area de Especialización: Mecánica de Rocas. Ha sido coordinador de Estudio de Impacto Ambiental en la Explotación de Canteras, Ladrilleras y Areneras en el Valle de Aburrá, Contrato Planeación Departamental Antioquia-Universidad Nacional Seccional Medellín y Deslizamiento en la Red Vial Nacional, Contrato MOPT-UN Santafé de Bogotá.

PRIMERA PARTE

RESUMEN

Después de una introducción en la que se esbozan los métodos analíticos utilizados en la Geotecnia Aplicada y se analizan las dificultades inherentes a cada método, se cuestiona por qué la Geomecánica no ha llegado a las minas tan rápido como se hubiera querido. En efecto estas obras, sui generis por su actividad, se encuentran en nuestro país más al abrigo de la experiencia adquirida in situ que a las aplicaciones de los desarrollos geomecánicos logrados en otros países. Posiblemente el desconocimiento o quizás la falta de credibilidad en estos logros, es la explicación de la ausencia casi total en la utilización de aquellos métodos en nuestro medio.

Siendo la determinación de los datos de entrada el mayor problema práctico para llevar a buen término cualquiera de los métodos analíticos, el texto recomienda una metodología que permite cuantificar aquellos parámetros, y en especial las características geomecánicas de esfuerzo, deformación y resistencia de las masas rocosas.

PALABRAS CLAVES

Mina, Túnel, Galería, Geomecánica Minera, Clasificación de masas rocosas, Elementos finitos, Esfuerzos y deformaciones in situ, Modelizaciones.

1. INTRODUCCION

Varios de los métodos analíticos frecuentemente empleados en la práctica de la geotecnia aplicada a obras civiles, han sido utilizados con éxito en aplicaciones al diseño minero: los elementos finitos, las diferencias finitas, el elemento de frontera y el análisis de la diaclasa. Estos métodos, si bien han alcanzado un alto grado de sofisticación, son directamente dependientes de la confiabilidad de los parámetros de entrada requeridos. En efecto, existe una gran necesidad de mejorar las técnicas de caracterización de los estratos: la determinación de las propiedades geomecánicas de las masas rocosas tales como la resistencia, la deformabilidad y los esfuerzos in situ, entre otros, son críticos para el éxito de las citadas metodologías.

Comparado con el tiempo que hace que el hombre ha extraído minerales mediante minería subterránea, el concepto de diseñar una mina es una innovación relativamente reciente. Además, la aplicación rutinaria de la geomecánica a la minería es un proceso que se ha desarrollado bastante más lentamente de lo que se hubiera querido. Aún más, en donde se ha utilizado para el diseño de una mina, se ha basado fundamentalmente en el empirismo, la experiencia práctica y el criterio del ingeniero, antes que en métodos analíticos.

Cabe preguntar entonces, ¿cuáles son las explicaciones para tal situación? Por doquier la razón principal es que la mayoría de las minas se encuentran en áreas que han sido explotadas desde siempre. El conocimiento empírico adquirido sobre la mecánica de rocas ha sido adecuado para una explotación eficiente allí donde los métodos de explotación han permanecido prácticamente sin ninguna modificación. Recientemente, no obstante, un gran número de factores han

conducido a una mayor aplicación de la mecánica de rocas al diseño minero: explotaciones en áreas en donde existe poca o ninguna experiencia previa, explotaciones en yacimientos más profundos o de mayor espesor que los que se explotaban anteriormente y la creciente necesidad de maximizar la recuperación, entre otros.

2. LA MINA

La mina es una excavación realizada en el subsuelo con el fin de extraer minerales. Es el conjunto de instalaciones destinadas a la extracción y tratamiento previo de dichas sustancias. Como tal, la infraestructura minera consta de una telaraña de túneles, galerías, inclinados, transversales, chimeneas, pozos internos y externos, niveles, subniveles, pisos, subpisos, páneces, coladeros, etc., destinados unos a ventilación, otros al transporte, a desplazamientos de los mineros, los terceros, a evacuación de aguas, los demás y a la explotación misma los últimos. Todas estas obras se caracterizan por sus: localizaciones (respecto a la profundidad, al frente de explotación, a los accidentes geológicos, al mineral, etc.), direcciones (paralelas al cruce de dos familias principales –situación bien desfavorable–, o en cualquier ángulo, sinuosas, etc.), inclinaciones (horizontales, subhorizontales, verticales), tamaños (aunque en general el tamaño de las galerías mineras es bien modesto, adecuado a su servicio, es frecuente encontrar en una misma mina galerías de diferentes dimensiones), formas (si bien las formas más usuales en minería son las de herradura –galerías principales en estéril– y las rectangulares –galerías en carbón–, es frecuente encontrar en la mina una gran variedad de formas: circulares, trapecoidales, ovaloides, cuadradas, etc.) y vida (la vida de una galería minera es función de su servicio: habrán unas que son permanentes y que tendrán que ser mantenidas a todo costo, otras que deberán servir durante un tiempo menos largo y las demás que tendrán una vida muy efímera –desaparecerán a medida que avance el frente de explotación o tras haber cumplido la finalidad buscada–). Por lo tanto cada una de ellas demanda de un cuidado particular inherente al servicio que presta y a las solicitudes a las cuales está sometida.

Podría decirse entonces que la estabilidad de la mina es la estabilidad de sus galerías. Desde el punto de vista minero esta infraestructura se va desarrollando a medida que avanza el conocimiento del yacimiento desde las labores de apertura hasta las de explotación propiamente dicha. La secuencia de dichas galerías, es:

- Apertura. Conjunto de labores de investigación geológica tales como galerías de investigación, pequeños pozos, socavones, etc.
- Acceso. Conjunto de labores principales que comunican las explotaciones con la superficie (de vida relativamente larga), mediante las cuales se accede al yacimiento. Ejemplo de ellas son los pozos inte-

riores y exteriores, los inclinados, las transversales principales y las galerías en dirección. Por regla general se localizan en la roca encajante.

- Preparación. Son todas las labores mineras que sirven para dividir el yacimiento con vistas a su explotación; igualmente hacen parte de éstas todas las labores necesarias antes de comenzar el arranque sistemático tales como coladeros, cámaras de arranque y demás labores análogas.
- Explotación. Son las labores que sirven para la recuperación del yacimiento: frentes de explotación en los tajos largos, páneces para la explotación por cámaras y pilares, chimeneas para la explotación por soutirage, etc.

De lo anterior se desprende que en la infraestructura minera se encuentran excavaciones de todo tipo, tal como quedó dicho atrás, intersectándose unas a otras a veces con cambios abruptos de sección y solicitadas unas más y otras menos por los fenómenos dinámicos generados por el avance de la onda de presión, suígeris a la explotación.

Estos cambios de sección, intersecciones, efectos dinámicos, inestabilidades geológicas y pérdidas de las propiedades mecánicas del macizo debido a los fenómenos de relajación y alteración (calentamiento, humedad, aire), son característicos de la mina. Además, frente a las construcciones subterráneas civiles, en general, puede decirse que la mina constituye una infraestructura tridimensional en tanto que aquéllas representan sólo infraestructuras lineales (túnel vial) o a lo sumo bidimensionales (proyectos hidroeléctricos).

3. DIFERENCIAS ENTRE TUNELES PARA OBRAS CIVILES Y PROYECTOS MINEROS

Además de las características antes mencionadas de las galerías mineras, existen muchas más consideraciones prácticas que difieren cuando se diseñan túneles para minas y para obras civiles:

- La mayor parte de los túneles para obras civiles son virtualmente permanentes: túneles para metros, túneles para proyectos hidroeléctricos, túneles viales y ferroviarios, galerías para conducción de aguas, etc., en tanto que los túneles mineros son temporales si bien, no obstante, algunos pueden tener una vida de servicio de varias décadas.
- Los túneles para obras civiles sirven principalmente para el público en general en tanto que los túneles mineros los utilizan solamente mineros prácticos.
- La longitud total de los túneles mineros excede en gran medida la longitud de los túneles excavados para propósitos de obras civiles y por lo tanto se emplean normas más exactas en estos últimos que en los mineros (por ejemplo en la exploración del sitio, en la excavación, en el soporte, etc.).

- Las condiciones del terreno en minería se conocen mejor debido a que su actividad en un mismo sitio se lleva a cabo durante muchos años en tanto que las estructuras civiles se localizan usualmente en terrenos que demandan de una detallada exploración del sitio.
- Las obras civiles se localizan generalmente cerca a su superficie (500 m. de profundidad, aproximadamente) en donde la influencia de los esfuerzos frecuentemente se despreja y en donde la ausencia de un estado de esfuerzos de compresión bien desarrollado da surgimiento al efecto dominante que los factores geológicos tienen en las obras civiles; en minería el estado de esfuerzos es de primordial importancia.
- Puesto que la minería es un proceso dinámico, las excavaciones mineras están sometidas a condiciones de esfuerzos cambiantes que demandan refuerzos de la roca diferentes a los que se necesitan en situaciones de esfuerzos estáticos; los túneles en obras civiles, en general, no experimentan cambios en las condiciones de los esfuerzos.
- En la minería los fondos para investigaciones y diseño son mucho más modestos que en proyectos civiles.
- Los sitios para obras civiles pueden a menudo seleccionarse a fin de obtener mejores condiciones de la roca, en tanto que en la minería la localización del yacimiento dicta el sitio.
- Las obras mineras nacen y crecen en el tiempo; las civiles tienen carácter definitivo al terminar su construcción. Esto implica que la mina se está construyendo día tras día.
- Los factores de seguridad alcanzan 1.3 - 1.4 y a veces más en las obras civiles, en tanto que en las mineras ese factor está por los lados de 0.9 a 1.1, en general. Esto es, se trabaja en condiciones de cuasi-estabilidad.

Las fotografías 1 y 2 reflejan bien algunas de las diferencias antes anotadas. La primera corresponde a una galería de transporte en una mina de carbón y la segunda al famoso túnel ferroviario de la Quiebra construido en Antioquia en el momento en el que la Mecánica de Rocas apenas sí se insinuaba.

4. METODOS DE DISEÑO EN GEOMECANICA MINERA

Los métodos de diseño corrientemente empleados para las aplicaciones a la minería pueden clasificarse como:

- 1) Métodos Empíricos
- 2) Métodos Geológicos
- 3) Métodos Observacionales

- 4) Métodos Analíticos
- 5) Métodos de Consentimiento: Restricciones gubernamentales.

Los Métodos Empíricos evalúan la estabilidad de la infraestructura minera mediante estudios estadísticos de condiciones subterráneas las cuales se soportan en la experiencia práctica y el criterio del ingeniero. Las clasificaciones ingenieriles de la masa rocosa constituyen el método empírico más conocido para garantizar dicha estabilidad. Las 7 clasificaciones más importantes son las de Terzaghi (1946); Laufer (1958); Williamson (1959 - 1960); Deere (1964); Wickham, Tiedemann y Skinner (1972); Bieniawski (1973), y Barton, Lien y Londe (1974). En su texto *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, capítulo 6, Bieniawski ofrece una detallada descripción de cada uno de ellos. Estos métodos han recibido una creciente atención en los últimos años y en muchos proyectos subterráneos se han utilizado como la única base práctica. En la minería, recientes aplicaciones incluyen la minería metálica (Kendorski et al., 1983) y la minería del carbón (Bieniawski et al., 1980; Ghose, 1981).

Los Métodos Geológicos identifican las estructuras geológicas y otros rasgos que afectan la estabilidad de los estratos. Para este propósito se emplean la perforación con extracción de núcleos, el mapeo geológico, el mapeo de isopacas, la fotografía aérea, los análisis de continuidad y las imágenes de satélite. Últimamente se han anexado el análisis de riesgos y el estudio mediante sensores remotos. Con estos métodos es posible determinar la estabilidad de bloques susceptibles a desplazarse así como la dirección de los esfuerzos principales, aspectos estos que son fundamentales para la correcta implantación de un túnel. Goodman, R. dedica todo un texto intitulado *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, 1976, a dichos métodos.

Los Métodos Observacionales demandan de un monitoreo continuo de los desplazamientos del terreno durante la excavación y del análisis de la interacción roca-soporte, a fin de detectar las potenciales inestabilidades. Se incluyen el Nuevo Método Austríaco de Construcción de Túneles, el Método Convergencia-Confinamiento y el Método Alemán de Control de Estratos. El capítulo 7 de Bieniawski, del texto antes citado, está enteramente dedicado a estos métodos.

Los Métodos Analíticos determinan los esfuerzos y las deformaciones alrededor de las cavidades subterráneas. Incluyen las técnicas de las soluciones exactas, los métodos numéricos, las simulaciones análogas y la modelización física. El éxito de estos métodos depende de la selección de los procedimientos de modelización más apropiados, de la validez de las relaciones constitutivas del comportamiento mecánico de las masas rocosas y de la confiabilidad de los parámetros de entrada requeridos para el análisis. Actualmente existe una copiosa bibliografía al respecto entre la que se destacan: *La Méthode des Eléments Finis Appliquée à la Mécanique des Roches*, de Fine Jacques y Vouille Gérard, 1980. *Contribution à l'Etude de la Mécanique des Terrains par une Méthode de Différences Finies*, de M. Dejean, 1970, tesis de Doctor-In-



Túnel de la Quebra. Boca de Santiago



Galería de transporte - Mina de carbón - Amagá - Antioquia

geniero. Contribution à l'Etude du Boulonnage. Application au Soutènement des Voies à la Mine de la Mure, Alvaro Correa Arroyave, 1983, tesis de Doctor-Ingeniero. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Chandrakant, S. Desai y Christian, John T., 1977, y Finite Elements in Geotechnical Engineering, D.J. Naylor y G.N. Pande, 1981, entre otros.

Los Métodos de Consentimiento pueden considerarse como procedimientos de diseño aparte porque independiente de los anteriores, los explotantes deben cumplir con las leyes mineras y demás disposiciones legales y otras limitaciones características de la actividad en sí (pozos de ventilación, galerías de transporte, salidas de emergencia, etc.).

Los principales factores que afectan la estabilidad minera son:

- 1) El campo de esfuerzos in situ.
- 2) La resistencia, deformabilidad y otras propiedades mecánicas de los estratos.
- 3) Las condiciones del agua subterránea
- 4) El método y la calidad de la excavación
- 5) El soporte de las galerías
- 6) La interacción entre vías adyacentes.

En diferentes universidades del mundo se realizan ingentes esfuerzos para desarrollar métodos de diseño adaptados a la explotación minera: la Escuela de Minas de París y la Escuela de Minas de Nancy, en Francia; la Universidad de Pennsylvania y el Instituto Tecnológico de Massachussets, en E.U., y el Imperial College, en Inglaterra, entre otras. Dichos métodos, mediante frecuentes retroalimentaciones, han permitido:

- 1) Recomendar los procedimientos geológico-ingenieriles para la caracterización del mineral y de los encajantes.
- 2) Determinar la eficiencia de los sistemas de clasificación de masas rocosas para el diseño minero.
- 3) Concluir en una fórmula de resistencia mejorada para el diseño de pilares, en particular de carbón.
- 4) Establecer pautas para el diseño del soporte de galerías en el mineral.
- 5) Relievar la importancia de los estudios sobre modelos, especialmente la técnica de la mesa de fricción, para analizar la estabilidad del techo de la mina. Recientemente en la Sección de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil se llevó a cabo un proyecto de grado consistente en el diseño de una mesa de fricción. Posteriores investigaciones permitirán modelizar toda una serie de situaciones mineras tanto a cielo abierto como subterráneas.
- 6) Evaluar las técnicas de los ensayos in situ para la determinación de la deformabilidad de la masa rocosa así como de los esfuerzos, en aplicaciones mineras.
- 7) Revisar los criterios de falla para su aplicación al mineral y a la roca encajante.

8) Transferir tecnología de procedimientos aplicados en la ingeniería civil, al control de estratos en la minería.

9) Desarrollar la modelización numérica, incluyendo estudios paramétricos, para evaluar la estabilidad de las intersecciones de galerías.

En la Tabla 1. se ilustra la metodología recomendada por la Universidad del Estado de Pennsylvania para su utilización en la minería del carbón explotada por cámaras y pilares.

5. MODELIZACION ANALITICA EN GEOMECANICA

La modelización en mecánica de rocas involucra las siguientes áreas: Conceptual (fundamento de la investigación), Física (modelos a escala), Analítica (soluciones exactas: Kirsch, Greenspan, entre otras) y Numérica (técnica del elemento finito, por ejemplo). Aunque los métodos Analíticos y Numéricos se describen algunas veces como estudios teóricos, es más apropiado definir los primeros como aquéllos que conllevan a soluciones exactas, en tanto que los segundos incluyen las técnicas de soluciones aproximadas tales como los elementos finitos, las diferencias finitas, los elementos de frontera, etc.

Debido a que la derivación de soluciones exactas es difícil o aún imposible en mecánica de rocas, las técnicas numéricas asumen particular importancia.

Al evaluar la eficiencia o limitaciones de las técnicas numéricas en minería, deben considerarse tres etapas relativas a la modelización: el desarrollo del modelo, la aplicación del modelo y la validez del modelo. En esencia, para propósitos mineros se encuentra hoy disponible un amplio abanico de posibles modelizaciones tanto bi como tridimensionales así como programas de computador para muchos comportamientos del material: elástico lineal, elástico no lineal, viscoelástico lineal, anisotrópico, ortotrópico, dilatante, estocástico, etc. Sin embargo, se requieren muchos más modelos así como sus correspondientes verificaciones.

Las técnicas numéricas han sobrepasado la capacidad de las minas para suministrar los datos de entrada necesarios para realizar dichas modelizaciones. Es por lo tanto esencial que se le dé la consideración necesaria a la obtención de los parámetros de alimentación reales y los métodos más adecuados para su determinación.

6. DATOS DE ENTRADA PARA LA MODELIZACION ANALITICA Y NUMERICA

Los parámetros geotécnicos que son importantes para la determinación de la estabilidad de las excavaciones

subterráneas, han sido extensamente estudiados y pueden identificarse como:

- Orientación de las discontinuidades en la masa rocosa.
- Espaciamiento de esas discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades incluyendo rugosidad, separación, persistencia, meteorización y relleno.
- Características del agua subterránea.
- Estado de esfuerzos in situ.
- Resistencia y deformabilidad del material rocoso intacto.

Generalmente para la aplicación de los métodos numéricos a la solución de problemas ingenieriles prácticos, se requieren los siguientes parámetros: condiciones geológicas del sitio en consideración, propiedades relevantes de las masas rocosas (deformabilidad o rigidez del sitio) y condiciones de frontera (esfuerzos in situ).

6.1. Método Integrado de Investigaciones de Campo

Las guías, surgidas de estudios de diseño en ingeniería de minas y civil, son las siguientes:

- Primero se requiere de una evaluación detallada de las condiciones geológico-ingenieriles de la masa rocosa, la cual debe expresarse en términos cuantitativos mediante una clasificación de las masas rocosas encontradas. Una clasificación tal, por ejemplo el RSR (Rock Structure Rating), el RMR (Rock Mass Rating - CSIR -), el MBR (RMR Básico Modificado) o el NGI (o Q) combina los efectos de varios parámetros geológicos y permite relacionar la experiencia adquirida en otros sitios, sobre las condiciones de la masa rocosa y los requerimientos de soporte, a las condiciones esperadas en el sitio en consideración. Es importante tener en mente igualmente la clasificación de Laubscher y Taylor la cual modifica el RMR para sus aplicaciones mineras (ver Hoek y Brown, *Underground Excavations in Rock*) a fin de tener en cuenta otros aspectos tales como el cambio de esfuerzos, las voladuras y la alteración del macizo.
- En segunda medida se requiere que como mínimo se emprendan dos campañas diferentes de ensayos in situ y un número suficiente de tales ensayos debe estar encaminado a la determinación de la deformabilidad de la masa rocosa in situ (módulo de deformación) en sectores estructurales representativos. Para este propósito se recomiendan el Ensayo de Placa Portante y el Gato Goodman.
- En tercer lugar deben determinarse los esfuerzos in situ en las áreas estudiadas, mediante el overcoring o el gato plano. Este último suministra igualmente un chequeo adicional de la deformabilidad de la masa rocosa.

- En cuarto término, y considerando que los ensayos in situ se llevan a cabo sólo en unos pocos sitios, deberán efectuarse reconocimientos geofísicos de la velocidad sísmica a fin de determinar la continuidad de las condiciones de la masa rocosa en toda el área del proyecto minero propuesto. La técnica de la microsísmica puede suministrar un chequeo del módulo de deformación in situ así como de la calidad de la masa rocosa al comparar la velocidad sísmica in situ con la de la roca intacta ensayada en el laboratorio.
- Finalmente debe emprenderse la toma de núcleos de roca sana de dimensión NX (54 mm de diámetro) en los sitios en donde se han realizado los ensayos de placa, a fin de establecer el RQD (Rock Quality Designation) y seleccionar las muestras para determinar en el laboratorio la resistencia, el módulo de elasticidad y la velocidad sónica. La experiencia muestra que los costos totales de un método tal, incluyendo todos los ensayos in situ, son generalmente menores del 1% del costo del proyecto.

Aunque se han reportado muchos estudios sobre investigaciones geológicas para trabajos mineros, poca atención sistemática se le ha dado al mapeo geológico ingenieril y al examen geotécnico de los núcleos para propósitos mineros. En efecto, la toma de datos geológicos para estos fines está lastimosamente retardada en comparación con los procedimientos utilizados en proyectos subterráneos en la ingeniería civil, tales como cavernas y túneles.

La toma de datos geotécnicos para propósitos de diseño ingenieril puede dividirse en tres etapas: estudios geológicos regionales, investigaciones geotécnicas en la mina (análisis de los núcleos de roca y observaciones de la perforación, mapeo geológico ingenieril, mediciones de mecánica de rocas, etc.) y ensayos de laboratorio.

6.2. Deformabilidad in situ

Los ensayos in situ son costosos y toman demasiado tiempo pero constituyen una importante ayuda para los proyectos mineros puesto que suministran datos del módulo de deformación de las masas rocosas, en contraste con el característico de la roca obtenido en el laboratorio sobre muestras sanas.

Existen muchos tipos de ensayos in situ: compresión, corte, placa portante, gato plano, presión radial, cámara de presión, gatos en sondeos, microsísmica, etc. Algunos ensayos in situ son relativamente fáciles de llevar a cabo pero su confiabilidad puede ser cuestionable a menos que sea posible una comparación de los datos obtenidos por varios métodos diferentes. Existe también un número de controversias respecto a los ensayos in situ. Se argumenta por ejemplo, que la dificultad en la interpretación de los datos de medición hace que a lo mejor éstos constituyan sólo una estimación abierta a la crítica y que no justifican por lo tanto los altos costos de su ejecución. La Figura 1 muestra una comparación de los resultados obtenidos de ensayos in situ según Bieniawski: todos muestran

una gran dispersión de los resultados a pesar de las condiciones bastante uniformes de la roca.

Recientemente se ha descubierto que el módulo de deformación in situ correlaciona bien con el RMR. Esto se describe en la Figura 2. La siguiente relación numérica, basada en 22 casos estudiados, parece ser funcional

$$E_m = 2 \times RMR - 100, \text{ GPa}$$

la exactitud en la predicción de esta ecuación es cercana al 20%, que es muy aceptable para propósitos de ingeniería de rocas.

6.3. Estado de Esfuerzos in situ

Las mediciones de los esfuerzos en los macizos rocosos usualmente dan importancia a las técnicas del overcoring (celdas de deformación USBM, celdas CSIR, etc.) y del gato plano. La Figura 3 indica los resultados de las mediciones de esfuerzos realizadas en algunas partes del mundo. Es aparente una clara tendencia en sus datos. Sin embargo, existe poca consistencia en la Figura 4 la cual muestra la variación de la relación entre las componentes de los esfuerzos horizontal y vertical, con la profundidad. A profundidades hasta cerca de los 800 m, los esfuerzos horizontales son superiores a los verticales: éste es un fenómeno universal.

Existen diferencias de opiniones respecto a los factores que gobiernan los esfuerzos horizontales y por lo tanto varios investigadores proponen sus propias conclusiones para evaluarlos, Figura 5.

6.4. Resistencia de las Masas Rocosas

Hoek y Brown propusieron recientemente el primer método satisfactorio para la predicción de la resistencia de la masa rocosa. Su criterio empírico de falla es:

$$\sigma_1/\sigma_c = \sigma_3/\sigma_c + (m\sigma_3/\sigma_c + S)^{1/2}$$

- σ_1 : esfuerzo principal mayor en la falla.
- σ_3 : esfuerzo principal menor aplicado.
- σ_c : resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- m y s : Constantes que dependen de las propiedades de la roca y de las características de la desintegración debido a la pareja de esfuerzos principales en la falla; para roca intacta $s = 1$. m se determina a partir de una adaptación de la ecuación anterior a los datos del ensayo triaxial. Para masas rocosas m y s pueden estimarse a partir de la clasificación geomecánica.

En su texto Underground Excavations in Rock, Tabla 12 y notas explicativas, Hoek y Brown dan no sólo los valores de m y s para varios tipos de roca y estados del macizo, sino además la forma de determinar las envolventes de Mohr mediante las expresiones adicionales:

En donde:

$$\tau_n = A(\sigma_n - \sigma_{tn})^B$$

$$\sigma_{tn} = \sigma_1/\sigma_c = 1/2 (m - \sqrt{m^2 + 4S})$$

$$\tau_n = \tau/\sigma_c \quad \sigma_n = \sigma/\sigma_c$$

TABLA 1

TABLA SIMPLIFICADA PARA EL DISEÑO DE GALERIAS MINERAS

RESTRICCIONES INGENIERILES		
Función	Tamaño	Forma Trazado Métodos de Apertura
OBJETIVOS		
Seguridad	Estabilidad	Economía
DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE ENTRADA		
Estructura Geológica (Mapeo geológico-ingenieril y análisis geotécnicos de núcleos)		
Propiedades de la roca y del estrato rocoso (Resistencia, deformabilidad y factores de influencia)		
Agua subterránea	Esfuerzos in situ	
Cargas Aplicadas (Cambio de esfuerzos debido a la explotación)		
METODOS DE DISEÑO		
Analítico (Modelos físicos y numéricos. Criterios de falla).	Empírico (Clasificaciones de la masa rocosa y experiencias)	Geológico (Riesgos geológicos y estudios de persistencia).
Observacional (mediciones de campo)	De Consentimiento (restricciones mineras)	
RESULTADOS DEL ESTUDIO		
<ul style="list-style-type: none"> - Luz del techo. - Reglas prácticas para el soporte de techo, piso y paredes. - Efecto de las intersecciones y excavaciones adyacentes 		
RETROALIMENTACION		
<ul style="list-style-type: none"> - Selección de la instrumentación para la conducción del monitoreo. - Medidas remediales en caso de inestabilidad. 		

7. CONCLUSION

Un amplio abanico de técnicas se encuentra disponible hoy día para la modelización analítica de los problemas geomecánicos hallados en la minería. Sin embargo esta modelización sólo puede ser una herramienta práctica de diseño minero si se combina con mejores procedimientos de recolección de datos para alimentar el modelo y se realizan más ensayos in situ para verificar la validez de los resultados. En esta etapa de evolución, la modelización analítica con un alto grado de sofisticación ha dejado la confiabilidad de los resultados a los datos de entrada requeridos para los modelos. Por lo tanto, existe una gran necesidad de mejorar los procedimientos de caracterización de los estratos.

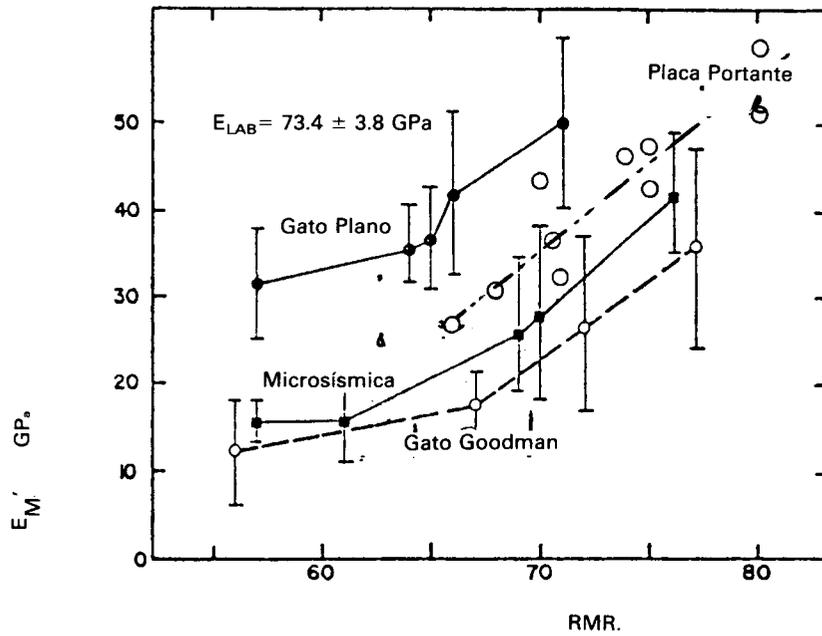


Figura 1. Ensayos in-situ. Resumen de resultados

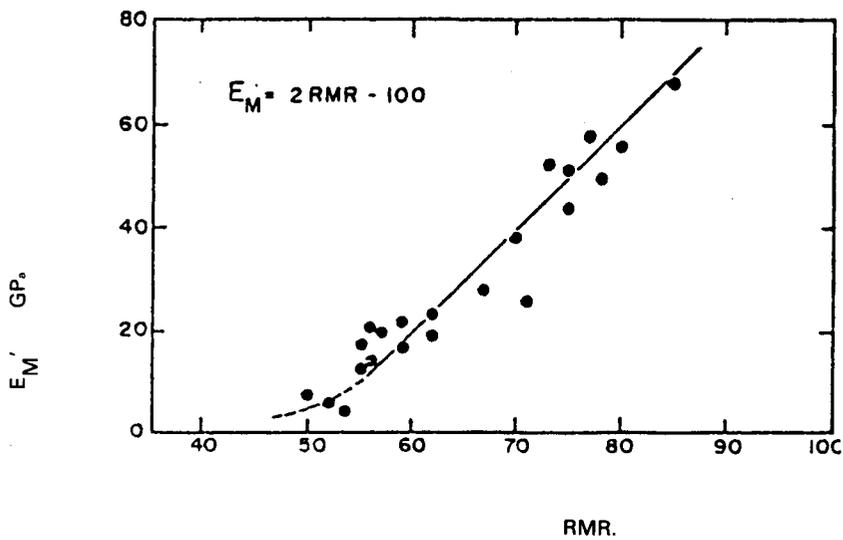


Figura 2. Correlación entre el módulo de deformación in-situ y el RMR

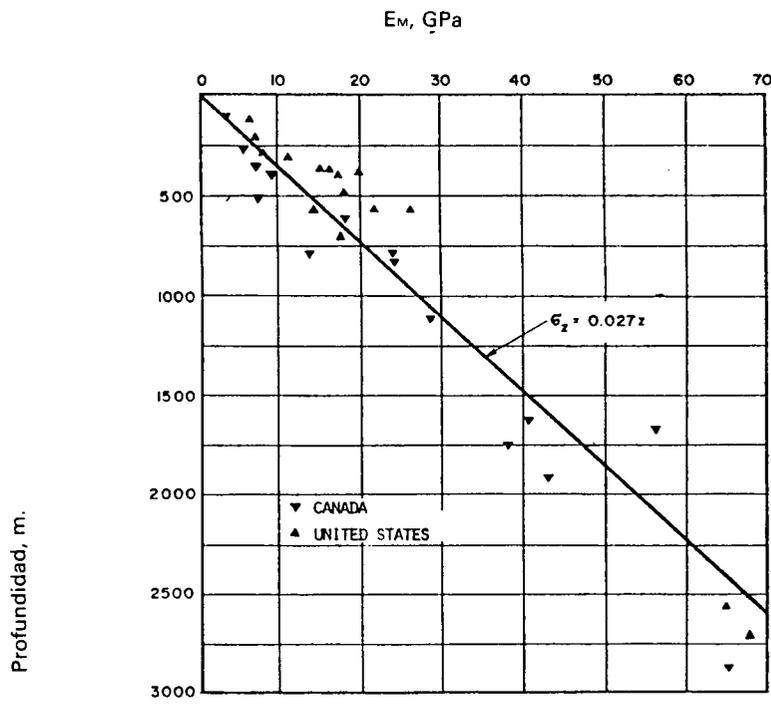


Figura 3. Esfuerzo Vertical VS Profundidad

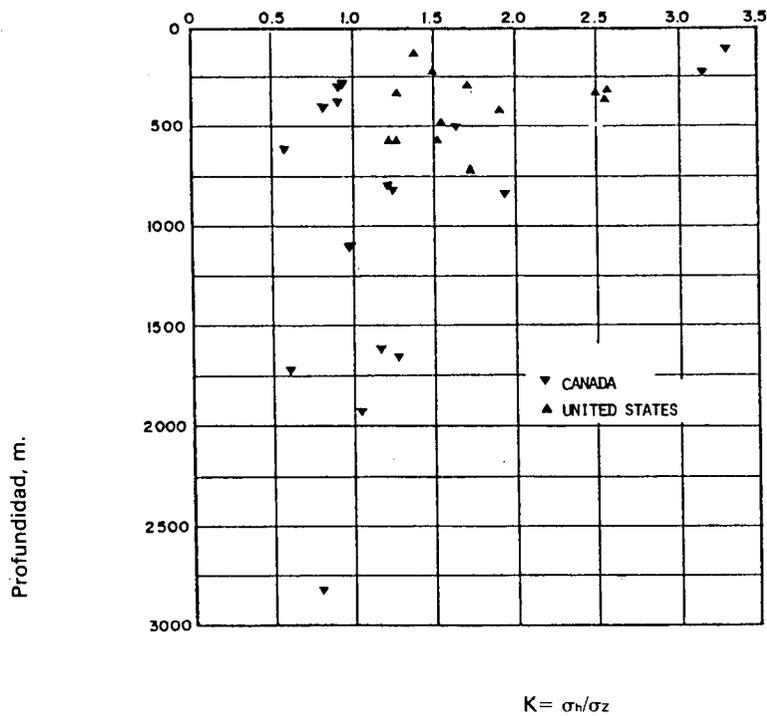


Figura 4. Variación de K con la Profundidad

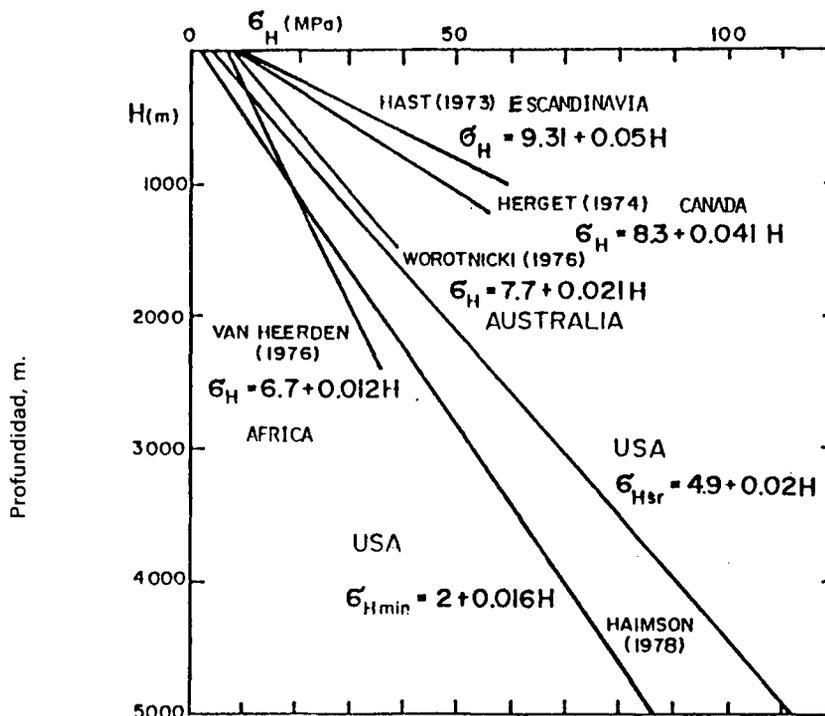


Figura 5. Comparación entre las relaciones propuestas para la variación de σ_H con la profundidad.

BIBLIOGRAFIA

CORREA, A. ALVARO. (1983). Contribution à l'étude du boulochage. Application au soutènement des voies à la mine de la Mure. Tesis de Doctor Ingeniero Universidad de Grenoble, Francia.

E. HOEK & E. T. BROWN. (1980). Underground Excavations in Rock. Mc Graw Hill Book Co., U.S.A. 634 pp.

M. BORECKI & M. KWASNIEWSKI. Editores. (1982). Application of Analytical Methods to Mining Geomechanics. A.A. Balkema, Rotterdam. 159 pp.

OBERT & DUVALL. (1967). Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. John Wiley & Sons, Inc.

FIGUET, JEAN PIERRE. (1983). La Modélisation en Mécanique des Terrains et son Application à l'exploitation minière. Tesis de Doctor és Sciences Ecole des Mines de Nancy.

FINE, JACQUES et VOUILLE GERARD. (1980). La Méthode des Eléments Finies Appliquée à la Mécanique des Roches. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 129 pp.

KIRKALDIE, LOUIS. (1987). Rock Classification Systems for Engineering Purposes. Ed. Library of Congress. 166 pp.

BIENIAWSKI, Z.T. (1984). Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. Ed. A. A. Balkema, Boston. 272 pp.