

**X SIMPOSIUM DE INGENIERIA EN MINAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MINAS
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

“FUNDAMENTOS DE GEODINÁMICA APLICADA A LA MINERÍA”

Autor:

Loren Lorig, Ph.D., P.E.
Gerente General, Itasca S.A.,
Santiago de Chile

RESUMEN

La geodinámica en la minería se preocupa de los movimientos vibratorios naturales (p.ej. terremotos) o inducidos (p.ej. tronaduras) y sus efectos sobre las estructuras mineras, tales como taludes de rajos abiertos, excavaciones subterráneas y presas de relaves. Consecuentemente, el comportamiento dinámico es un aspecto a considerar en prácticamente todas las minas. En Chile la dinámica resulta particularmente importante en la minería debido al potencial de fuerte actividad sísmica en casi todos los yacimientos. En este artículo, se comienza presentando las diferencias en los contenidos de frecuencias y duraciones para vibraciones por tronadura, estallidos de roca y terremotos. Posteriormente, se describe la forma en que se pueden aplicar métodos numéricos para estudiar el efecto de los movimientos vibratorios en diversas estructuras mineras. El artículo incluye los siguientes estudios: evaluación del daño en bancos debido a vibraciones de tronaduras en rajos abiertos, efectos de estallidos de rocas en excavaciones subterráneas y el comportamiento de presas de relaves sometidas a movimientos sísmicos. En cada uno de los estudios se hace especial énfasis en las consideraciones geodinámicas más relevantes.

INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que la consideración de efectos dinámicos aporta un grado de complejidad adicional a los desafíos inherentes al análisis estático. De hecho, hay quienes opinan que la complicación adicional involucrada en el análisis dinámico hace que tales análisis carezcan de sentido. Este artículo intenta mostrar que el conocimiento actual del comportamiento dinámico y la existencia de modelos computacionales que pueden representar estos problemas, han alcanzado un punto tal, que se puede apoyar la toma de decisiones en base a la aplicación de principios de geodinámica. Los principios pueden discutirse en tres amplias áreas: fuente, transmisión y efecto.

Las fuentes de energía dinámica de importancia para yacimientos mineros incluyen terremotos, estallidos de roca y las tronaduras con explosivos. Cada fuente tiene diferentes contenidos de frecuencia y duración, como se muestra en la Figura 1. Los movimientos por terremotos tienden a ser de frecuencia baja, pero de duración bastante larga. Las tronaduras tienen la duración muy corta, pero con una frecuencia alta. Los estallidos de roca pueden ser considerados como pequeños terremotos con la frecuencia generalmente más alta y la duración más corta comparado con los terremotos.

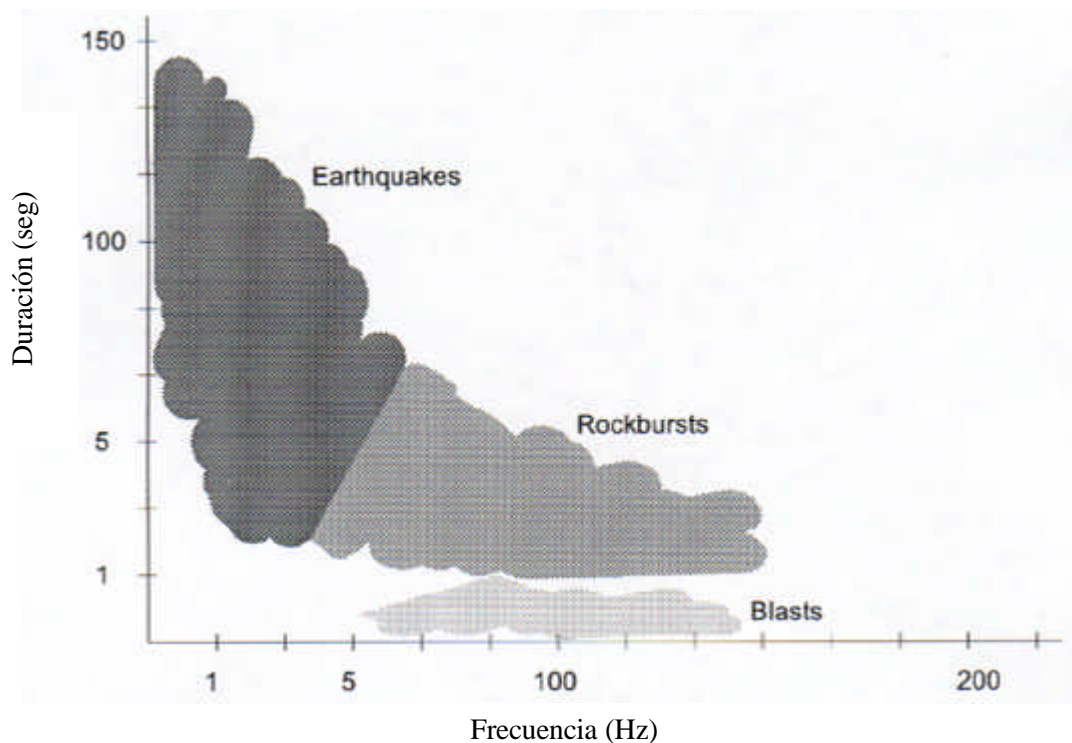


Figura 1 Frecuencias Típicas y Duraciones para Problemas Dinámicos de Interés en Minería

La transmisión de ondas dinámicas desde la fuente al punto de interés depende del material a través del cual deben pasar las ondas. En general, los materiales más competentes (como las rocas) transmiten las ondas con menos atenuación (pérdida de energía) que los materiales menos competentes (como los suelos).

La principal preocupación para la industria minera es el efecto (es decir, el daño) que ocasiona el movimiento dinámico sobre la estabilidad. Las estructuras mineras de interés incluyen excavaciones subterráneas, bancos y taludes de minas a rajo abierto, presas de relaves, botaderos y pilas de lixiviación. La interacción de estas estructuras con las ondas dinámicas incidentes se discute en ejemplos presentados más adelante en este artículo. Antes de esto, se discute con más detalle la caracterización de las fuentes dinámicas y la transmisión de las ondas.

En este artículo, se realizan cálculos de movimiento dinámico mediante los programas *FLAC* (Fast Lagrangian Analysis of Continua) y *FLAC^{3D}*. *FLAC* y *FLAC^{3D}* son programas de análisis desarrollados por Itasca Consulting Group en Minneapolis, EE.UU. Los cálculos en estos programas utilizan el método de las diferencias finitas explícitas: se resuelven las ecuaciones completas del movimiento utilizando masas concentradas en puntos de una malla de análisis, derivadas a partir de la densidad real de las zonas de la vecindad. Esta formulación puede ser acoplada a modelos de elementos estructurales en cada programa, permitiendo de esta forma un análisis de la interacción suelo-estructura que resulta del movimiento del suelo inducido dinámicamente. El análisis dinámico también puede ser acoplado con procesos de flujo subterráneo de agua. Esta capacidad permite, por ejemplo, la realización de análisis que involucran cambios de presión de poros dependientes del tiempo, como los asociados con fenómenos de licuación.

FUENTES EXPLOSIVAS

La representación apropiada de la fuente explosiva es una dificultad significativa en los estudios de tronaduras. En general, es difícil estudiar el campo cercano a los tiros de tronadura. Esta región es complicada debido al comportamiento altamente no lineal del material que involucra fracturamiento y el escape de la presión de los gases hacia fracturas recientemente creadas. Estas complicaciones hacen difícil la especificación de las condiciones de borde para las presiones dependientes del tiempo en la vecindad de los tiros. Por consiguiente, en lugar de modelar el efecto de la fuente explosiva en la pared del tiro, se aplican usualmente presiones o condiciones de velocidad dependientes del tiempo a una cierta distancia de la fuente real (p.ej. 0.25 m). A menudo se asume que la forma general de la fuente aplicada es similar a la historia de presión explosiva de la fuente real (por ejemplo, un pulso triangular que alcanza la máxima presión o velocidad en un corto tiempo, seguida por un tiempo de decaimiento relativamente largo). La magnitud de la presión o velocidad máxima puede ser calibrada comparando historias medidas y modeladas a una cierta distancia de la fuente. Un ejemplo de este procedimiento se muestra a continuación.

Se detonó un solo tiro y las vibraciones fueron grabadas en un geófono que se localizó a una distancia de 52 m y a una profundidad de 11 m. El tiro se extendía hasta los 17.5 m bajo la superficie. La carga base era de 400 kg de HEET 930 (densidad = 1050 kg/m³). La carga de la columna era de 100 kg de ANFO (densidad = 780kg/m³). Se realizó un análisis axisimétrico con una historia de velocidad aplicada a 0.25 m del eje del tiro. La roca se representó como un material elasto-plástico con envolvente de falla tipo Mohr-Coulomb. Las propiedades elásticas produjeron una velocidad de propagación de la onda P de 2340 m/seg. Los parámetros de amortiguamiento de Rayleigh que se comentan en la próxima sección se seleccionaron mediante pruebas. La frecuencia de amortiguamiento fue determinada realizando una transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) del registro del geófono. La FFT mostró que la

mayor energía estaba asociada a una frecuencia de 25 Hz. Una fracción del amortiguamiento crítico de 0.1% a 25 Hz produjo resultados razonables. Usando la función de entrada definida en la Figura 2, el análisis axisimétrico produjo los resultados mostrados en la Figura 3.

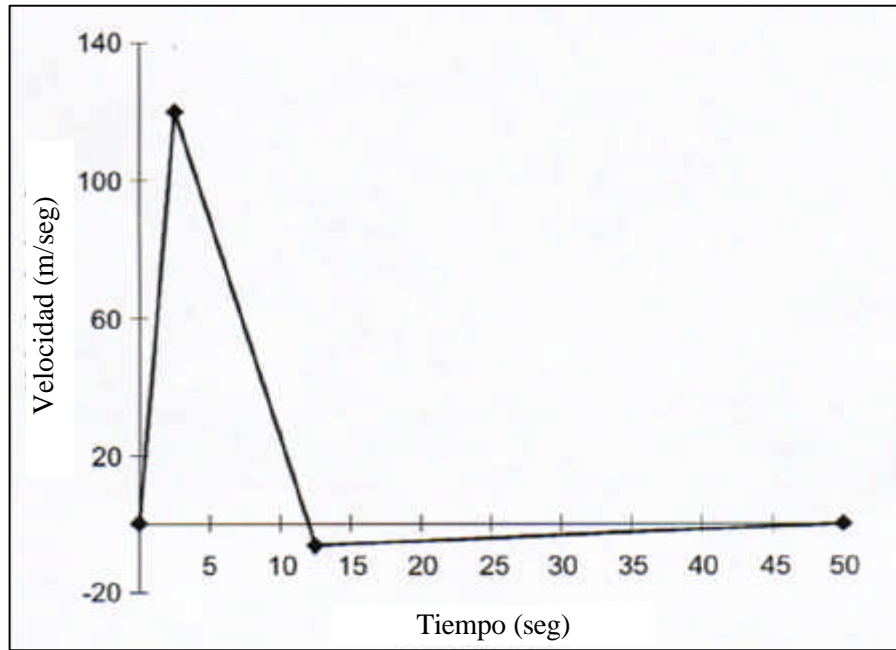


Figura 2 Forma de la Onda de Entrada Para Representar Tronadura

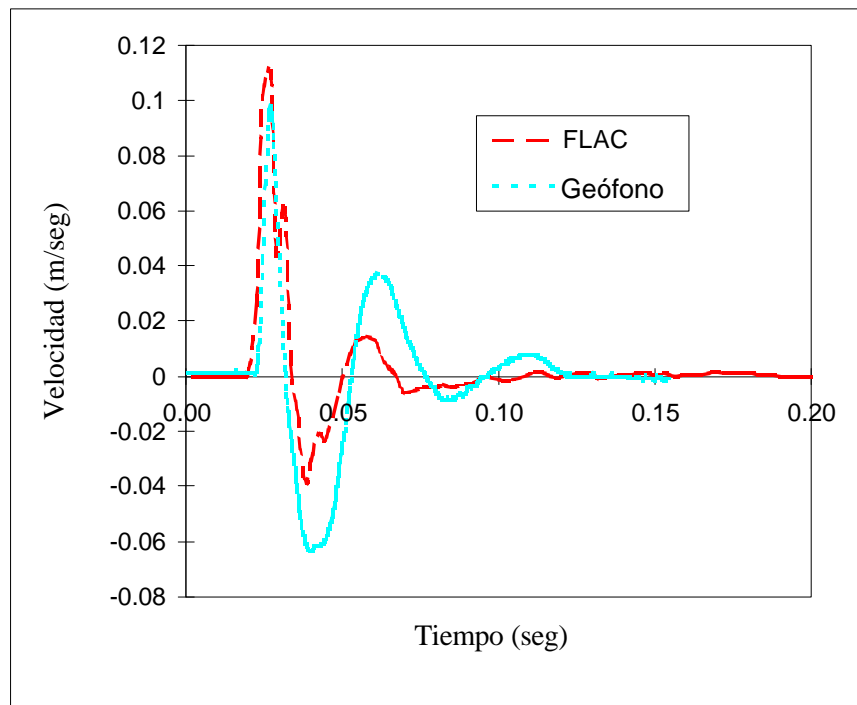


Figura 3 Comparación de Historias de Velocidad Horizontal vs. Tiempo Registrada y Calculada a 52m de la Tronadura

TRANSMISION DE ONDAS

En un análisis dinámico, puede ocurrir una distorsión numérica en la propagación de la onda como una función de las condiciones modeladas. Tanto el contenido de frecuencias de la onda incidente como las características de velocidad de onda del material pueden afectar la precisión en la transmisión de ésta. Kuhlemeyer y Lysmer (Ref. 3.) muestran que para una representación precisa de la transmisión de ondas a través de un modelo, el tamaño del elemento debe ser menor del 10 al 12 por ciento de la longitud de onda asociada con el componente de frecuencias más alto de la onda incidente (es decir, la fuente). La realización de una transformada rápida de Fourier (FFT) de la onda es la manera más conveniente de determinar los contenidos de frecuencias de la onda de entrada. El resultado normalmente se presenta en un gráfico de energía versus frecuencia a partir del cual se pueden evaluar las frecuencias de interés (es decir, las frecuencias asociadas con las mayores cantidades de energía). La longitud de onda, λ , asociada con una frecuencia se estima usando una de las expresiones siguientes, dependiendo de si la onda considerada es del tipo P o S.

$$I = \frac{C_p}{f} \qquad I = \frac{C_s}{f}$$
$$C_p = \sqrt{\frac{(K + 4G/3)}{\rho}} \qquad C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

donde C_p = velocidad de propagación onda p
 C_s = velocidad de propagación onda s
 K = módulo elástico de deformación volumétrica
 G = módulo elástico de corte
 ρ = densidad del material

Los sistemas dinámicos naturales contienen un cierto grado de amortiguamiento de la energía de vibración en el sistema; de otra forma el sistema oscilaría indefinidamente cuando está sujeto a fuerzas externas. El amortiguamiento es debido, en parte, a la pérdida de energía como resultado de la fricción interna y/o al desplazamiento a lo largo de las estructuras. Para un análisis dinámico, el amortiguamiento debe intentar reproducir las pérdidas de energía en el sistema natural. En suelos y rocas, el amortiguamiento natural se origina principalmente en la histéresis y es independiente de la frecuencia.

En programas numéricos que operan en el dominio del tiempo, como el usado en este caso, normalmente se utiliza el amortiguamiento tipo Rayleigh para proporcionar un amortiguamiento aproximadamente independiente de la frecuencia sobre un rango restringido de frecuencias. Los coeficientes típicos respecto al amortiguamiento crítico que se incorporan mediante este método son del 2 al 5% en suelos y menores del 0.2% para rocas.

En ingeniería sísmica es común el método “lineal equivalente” para el modelamiento de la transmisión de ondas en sitios estratificados y en interacción dinámica suelo/estructura. Dado que este método es más común que el procedimiento completamente no lineal que utiliza **FLAC**, es importante describir algunas de las diferencias entre ambos métodos.

En el método lineal-equivalente (Ref. 5.), se realiza un análisis lineal. En diversas regiones del modelo se suponen algunos valores iniciales para los coeficientes de amortiguamiento y módulo de corte. Se registra la deformación de corte cíclica máxima para cada elemento y ésta se utiliza para determinar nuevos valores de amortiguamiento y módulo, mediante una referencia a curvas obtenidas en laboratorio que relacionan el amortiguamiento y el módulo secante con la amplitud de deformación de corte cíclica. Usualmente se utiliza un factor de escala empírico cuando se relacionan las deformaciones de laboratorio y las obtenidas en el modelo. En el siguiente paso de análisis se usan los nuevos coeficientes de amortiguamiento y módulo de corte. El proceso entero se repite iterativamente, hasta que no se obtengan cambios en las propiedades. En este punto, se dice que se han encontrado valores "compatibles con las deformaciones" para los coeficientes de amortiguamiento y el módulo de corte, y la simulación que usa estos valores se considera representativa de lo que se observa en terreno.

En contraste, con un método completamente no lineal se realiza solamente una corrida (aparte de pruebas de sensibilidad de los parámetros, que se realizan con ambos métodos), debido a que la no-linealidad en la relación esfuerzo-deformación es seguida directamente para cada elemento en la medida que transcurre el tiempo. En la medida que se utiliza una relación constitutiva no lineal apropiada, la dependencia del amortiguamiento y del módulo aparente respecto del nivel de deformación se representa automáticamente.

Ambos métodos tienen fortalezas y debilidades. El método lineal equivalente se toma fuertes libertades en la física, pero es amistoso al usuario y acepta directamente resultados de pruebas cíclicas de laboratorio. El método completamente no lineal representa la física correctamente, pero requiere más participación del usuario en decisiones teóricas.

EFECTO DEL DAÑO POR TRONADURA EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

La tronadura en roca es un proceso dinámico altamente complejo. El daño en la roca ocurre mediante la interacción de factores tales como la onda de choque inicial de la detonación, la penetración de los gases en las fracturas y las complejidades geológicas propias de la roca. Diversos aspectos de la tronadura, como la fragmentación y salida del material se pueden controlar a través del tamaño de los tiros y el esquema de salida, la cantidad y tipo de explosivo y la secuencia de detonación. El daño al talud también puede controlarse limitando factores como el tamaño de las cargas, el diámetro de las perforaciones, el número de caras libres, y el espaciamiento/carga de la fila de tiros más cercana a la cara final. Sin embargo, es difícil predecir los efectos de estos tipos de modificaciones para macizos rocosos específicos.

El daño por tronadura tradicionalmente se correlaciona con los niveles de velocidad máxima de partículas (*Peak Particle Velocity* - PPV) experimentados por el macizo rocoso debido al paso de la onda de choque inducida por la tronadura. Ocurre daño si la PPV excede un nivel umbral, que debe determinarse experimentalmente para diferentes sitios y tipos de rocas. Midiendo PPVs a diferentes distancias de una tronadura, se pueden extraer factores de atenuación específicos para un sitio, lo que a su vez permite calcular la disminución de la velocidad de partículas para diferentes tamaños de cargas. Esta información se usa para construir gráficos de los cuales se puede seleccionar la carga por retardo que producirá PPVs por debajo de los niveles críticos de daño a una cierta distancia del tiro. Este método está basado completamente en la observación y

se ha usado durante muchos años (ver, por ejemplo, Mojtabei y Beattie (Ref. 4.), que acostumbran utilizar una estrategia empírica para la predicción del daño en tronaduras de bancos). Debe notarse que las PPVs son normalmente medidas en la superficie y no siempre representan los niveles de PPV debajo del suelo. La estrategia empírica no puede tomar en cuenta los efectos de la geometría del banco, la secuencia de detonación, la disponibilidad de caras libres, etc. El uso del método no produce principios generalizables que puedan aplicarse en tronaduras para diferentes situaciones.

Recientemente se han desarrollado métodos numéricos que permiten considerar estos factores. La información de estos modelos se puede disponer en una variedad de formas, incluyendo contornos de PPV, como los mostrados en la Figura 4. En esta figura, se simula la carga discutida previamente y se registran y presentan los PPVs a través del macizo rocoso. Notar que los contornos no están relacionados simplemente con la distancia de la carga como se predeciría por una metodología empírica. A la vez, las PPV en la superficie no son necesariamente representativas de las PPV en profundidad.

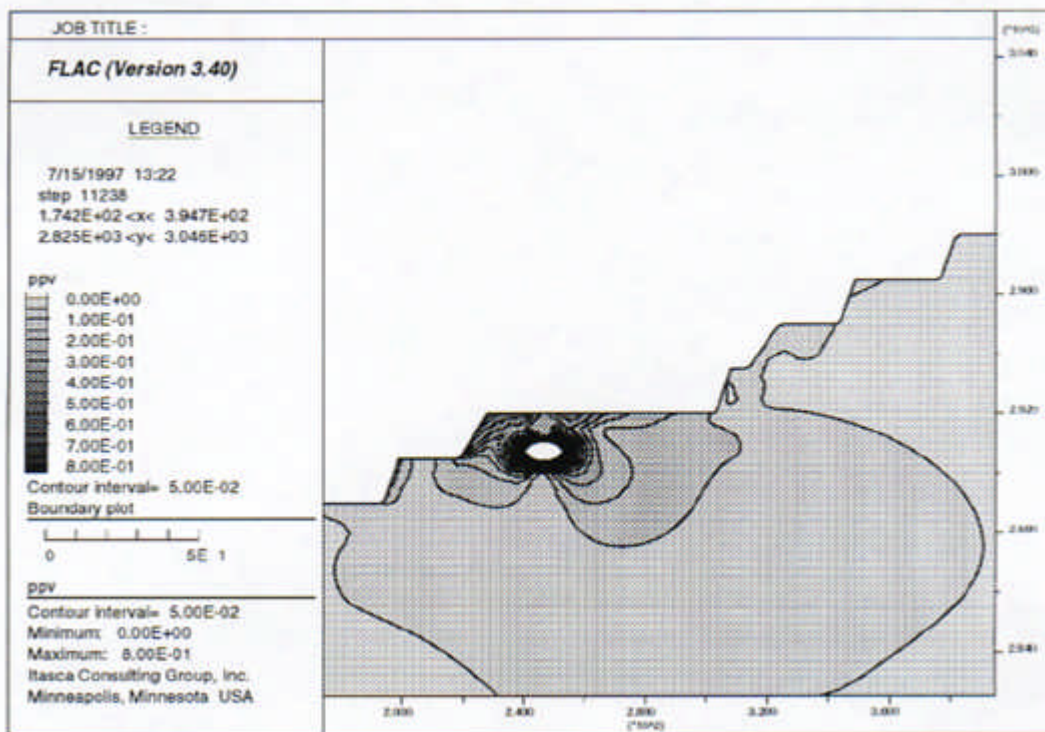


Figura 4 Contornos de Velocidad Máxima de Partícula (PPV) Calculados Para un Tiro Único

La confianza en el procedimiento de modelación puede ser incrementada mediante la comparación de los resultados de los modelos con las observaciones y mediciones en terreno. Se pueden comparar observaciones de daño con figuras que muestren los fallamientos de la roca (como se presenta en la Figura 5). Adicionalmente, en este caso, geófonos localizados cinco bancos sobre la explosión grabaron el movimiento inducido por la tronadura. En la Figura 6 se ilustra una comparación de las velocidades registradas en terreno y las obtenidas en el modelo.

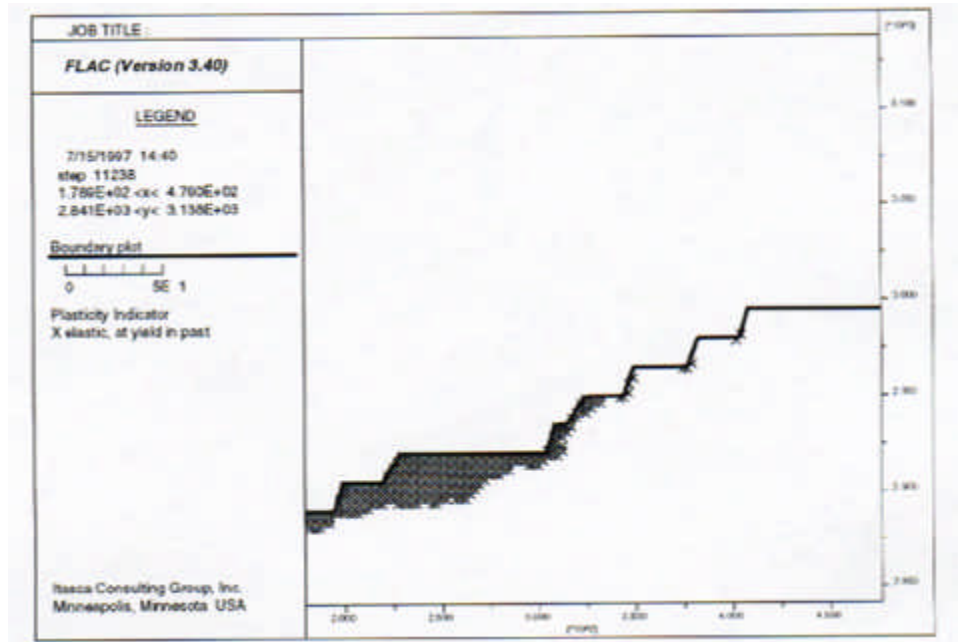


Figura 5 Área Calculada de Roca “Fallada” Para la Tronadura Mostrada en la Figura 4

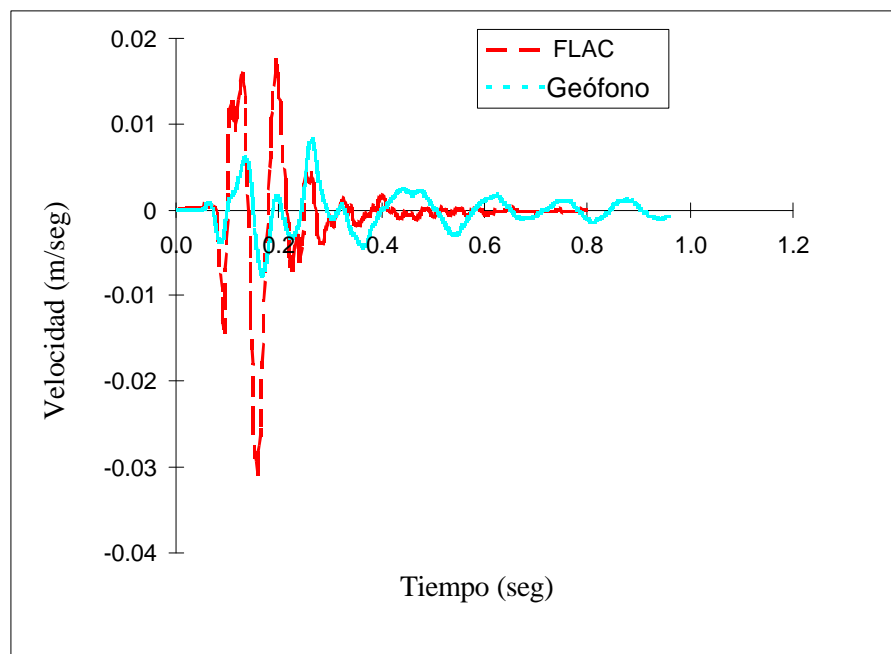


Figura 6 Comparación de Velocidades Horizontales en el Tiempo para Registros Medidos y Obtenidos en Modelo 5 Bancos Arriba de la Tronadura Mostrada en la Figura 4

EFECTO DE ESTALLIDO DE ROCAS EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS

La excavación de rocas en profundidad y la redistribución de esfuerzos resultante puede causar la propagación de grietas y movimiento a lo largo de planos de fractura pre-existentes. Este proceso normalmente se ve acompañado por la generación de ondas sísmicas y generalmente es denominado como sismicidad inducida por la explotación. Joughin y Jager (Ref. 2.) describen dos tipos de eventos sísmicos en minas: aquellos causados por el inesperado fallamiento frágil de roca debido a las concentraciones de tensión alrededor de una labor explotada y aquellos causados por movimientos en fallas mayores y otras discontinuidades debido a la interacción de los esfuerzos tectónicos y los esfuerzos provocados por la explotación lejos de las áreas explotadas. Los estallidos de roca más perjudiciales generalmente están asociados con el segundo tipo de evento sísmico. En esta sección se presenta un ejemplo de este tipo de estallido de roca, tomado de Tinucci y Spearing (Ref. 7.).

El ejemplo presenta los resultados de un estudio para evaluar los efectos dinámicos del deslizamiento de una falla sobre la estabilidad de un cuerpo tabular bajo condiciones de altos esfuerzos. El evento real simulado es de magnitud $M_n = 4.7$, originado por el deslizamiento de una falla y que resultó en un extenso daño producto del estallido. Se desarrolló un modelo bidimensional simple (ver Figura 7) incluyendo los caserones y la falla. Una falla sub-vertical atraviesa por la mitad el modelo. Caserones tabulares delgados se ubican a ambos lados de la falla y la intersectan perpendicularmente. El desplazamiento de la falla fue calibrado en el modelo en base a velocidades registradas en geófonos y a mediciones de desplazamientos efectuadas en la falla. El desplazamiento de la falla se gatilló mediante la reducción de la cohesión en una sección de la falla por debajo del caserón inferior.

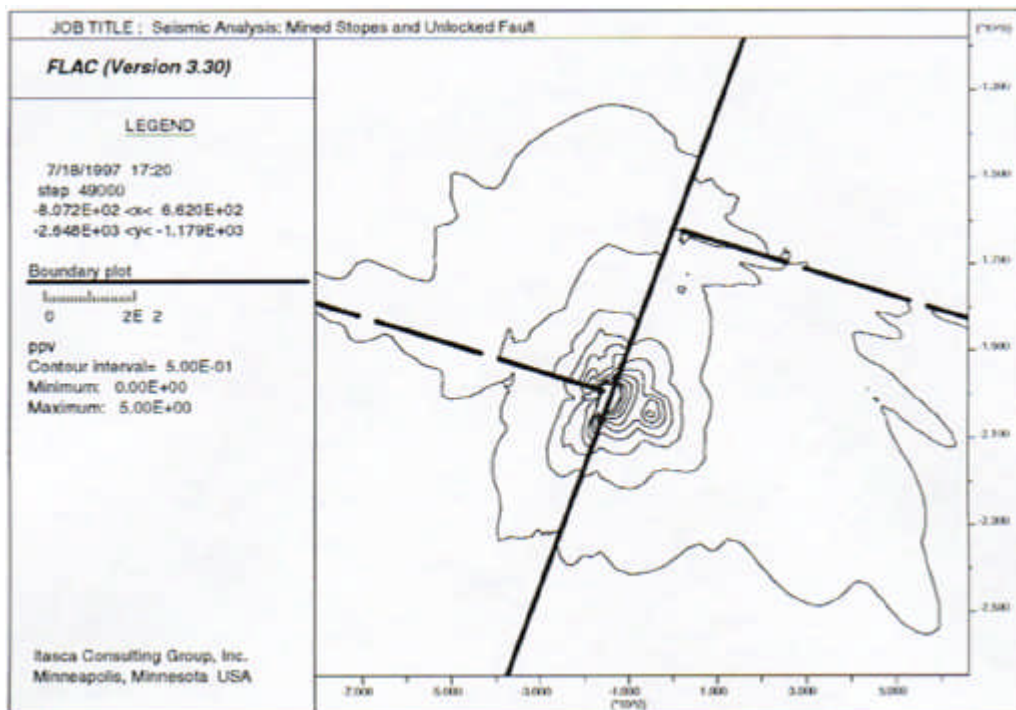


Figura 7 Contornos de Velocidad Máxima de Partículas (PPV) Resultante del Deslizamiento de una Falla Subvertical. Hay Caserones a Ambos Lados de la Falla

El destrabamiento de la falla produjo contornos de velocidad máxima de partículas (PPV) como los mostrados en la Figura 7. Los resultados sugieren que el daño en el caserón no es solamente función de la magnitud del evento y de la distancia a la fuente, sino que el daño a la labor también se ve afectado por su orientación relativa a la dirección de propagación de la onda y la geometría de los pilares remanentes. Los resultados muestran que el daño tiene la misma posibilidad de ocurrir en los caserones superiores como en los caserones inferiores, aun cuando están más lejos de la fuente. Este resultado concuerda con el daño real observado en terreno para los caserones superiores e inferiores cercanos a la falla, aunque las labores superiores estaban a más de 400 m de la fuente.

EFECTO DE TERREMOTOS EN DEPÓSITOS DE RELAVES

La exigencia de una operación segura y continua de estructuras geotécnicas superficiales tales como depósitos de relaves, botaderos y pilas de lixiviación, a menudo requiere revisar las cargas dinámicas que resultan de terremotos. En relaves saturados, la carga dinámica juega un rol importante en la iniciación del proceso de licuación. La licuación resulta en una pérdida temporal de la capacidad de soporte del relave e históricamente ha sido la causa de considerables daños.

El análisis normalmente empieza con la especificación de un terremoto de diseño. El terremoto de diseño puede ser el registro de un terremoto real (aceleración) de algún otro lugar, que se adapta para el sitio a analizar. Alternativamente, se puede generar un terremoto artificial para el sitio de interés. El concepto básico de generar y utilizar terremotos artificiales en análisis sísmicos fue propuesto por Housner y Jennings (Ref 1.). El establecimiento del contenido de frecuencias, amplitud y duración para simular un terremoto artificial en una zona en particular es una tarea difícil. Saragoni y Hart (Ref. 6.) describen un procedimiento para el desarrollo de un terremoto artificial. Para ayudar en el proceso, ellos proporcionan valores de parámetros característicos a partir del análisis de 26 acelerogramas registrados. Se puede realizar un escalamiento de la magnitud del terremoto (ya sea adaptado o artificial) en base a consideraciones tales como:

1. tipo de estructura;
2. importancia del colapso; y
3. adecuación de la información histórica para el lugar analizado

Otro elemento importante del proceso de análisis es la estimación de las propiedades de los materiales y particularmente del material de relave, que generalmente es del tamaño de arena y que puede desarrollar incrementos de presión de poros durante cargas cíclicas. Si la presión de poros aumenta al punto que los esfuerzos efectivos se hacen cercanos a cero, el resultado es la licuación del material. La susceptibilidad a la licuación se evalúa usualmente realizando ensayos de corte cíclico en laboratorio. Estos ensayos se pueden realizar en condición drenada o no drenada, aunque son más comunes los ensayos no drenados. En los ensayos se registra la generación de presión de poros en función del número de inversiones del corte (es decir, ciclos). En el esquema de análisis no lineal descrito anteriormente, se seleccionan el modelo del material y los parámetros que permitan la reproducción más cercana de los ensayos de laboratorio.

La estimación del efecto de un terremoto en una estructura como el muro de un depósito de relaves, se inicia estableciendo las condiciones estáticas (esfuerzos, presiones de poros, etc.) que actúan sobre la estructura y en su interior. Luego se aplica en la base del modelo el movimiento sísmico seleccionado y se desarrolla la simulación para el registro completo del terremoto, o hasta que la mayoría de la energía asociada con el registro se ha aplicado al modelo. En la medida que se transmite el movimiento del terremoto a través del modelo (y éste es reflejado desde la superficie), se acumulan desplazamientos permanentes. En cualquier momento durante el análisis, se puede comparar la geometría resultante con la geometría original, como se muestra en la Figura 8.

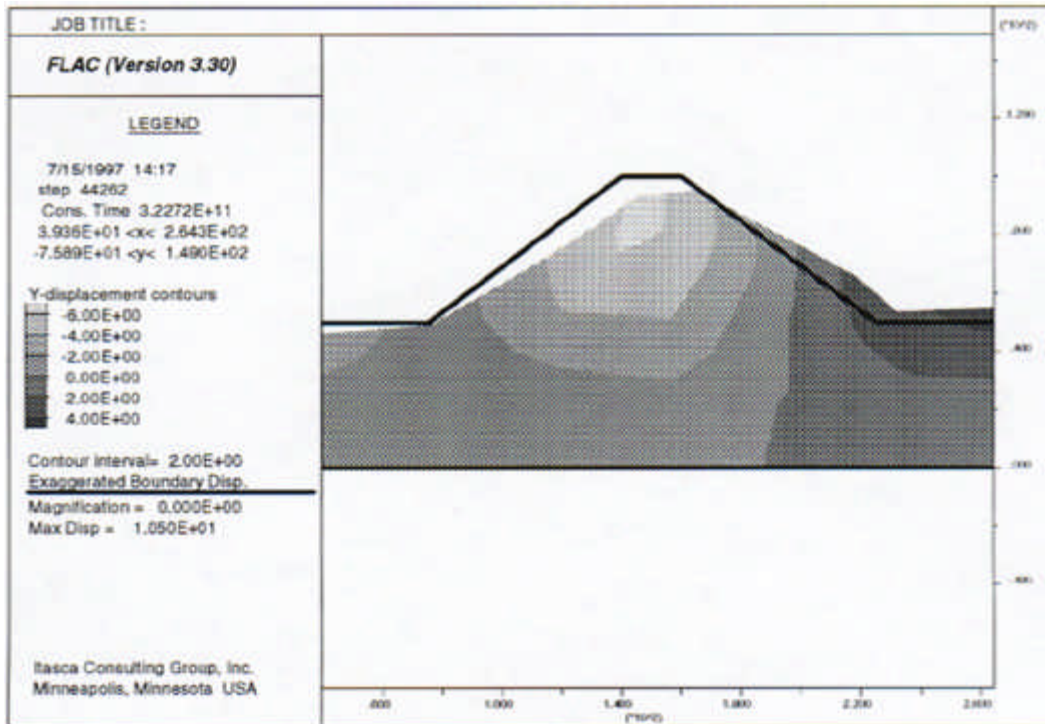


Figura 8 *Formas Original y Deformada del Muro Como Resultado de la Aplicación de un Terremoto en la Base del Modelo*

Si la estructura se emplaza en un valle ancho, el análisis bidimensional puede ser suficiente. Sin embargo, si la construcción se realiza en un valle angosto, puede ser necesario efectuar un análisis tridimensional. La Figura 9 muestra un muro y su fundación descansando en un valle en forma de V. El muro está sujeto a cargas hidrostáticas en su cara de aguas arriba. Se aplica un sismo de 0.4g en las paredes del valle. La Figura 10 muestra los contornos de desplazamiento final, ilustrando una gran área de asentamiento hacia aguas abajo del coronamiento.

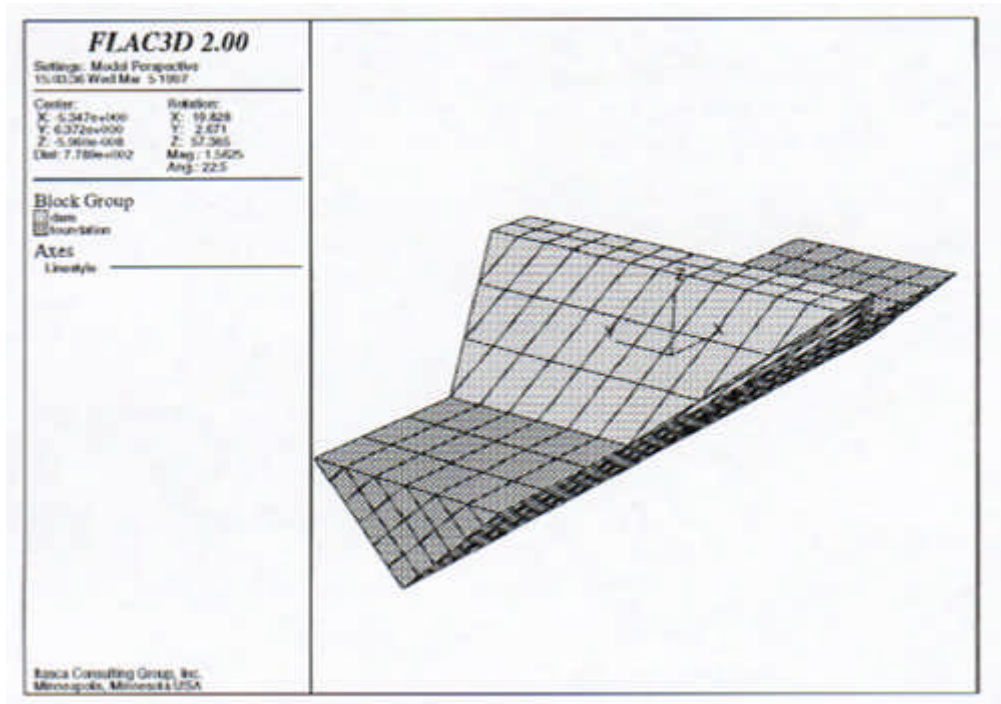


Figura 9 Malla del Dique y Fundación

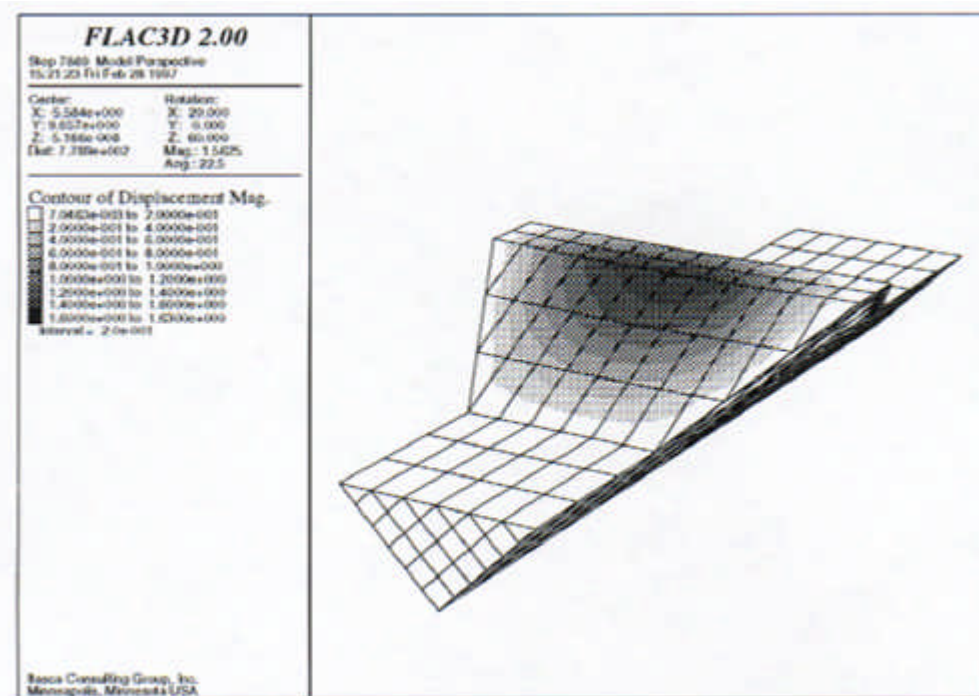


Figura 10 Contornos de Magnitud de Desplazamientos Finales

CONCLUSIONES

Los cambios repentinos en el estado de carga en un macizo rocoso o suelo se encuentran asociados con eventos tales como los deslizamientos súbitos en planos de debilidad o las violentas cargas por tronadura en la superficie interior de un tiro. Tales cambios resultan en la generación y transmisión de ondas de cuerpo en el medio. En este artículo se han empleado modelos continuos para simular la transmisión de las ondas de onda cuerpo y también se han utilizado modelos continuos para evaluar los efectos de las ondas cuando ellas impactan infraestructuras mineras. Este método es un primer acercamiento razonable a muchos problemas en geodinámica minera. Sin embargo, algunos problemas, particularmente aquellos que involucran grandes bloques de roca, requieren que las discontinuidades sean consideradas explícitamente. El diseño de soportes para restringir el movimiento de bloques alrededor de excavaciones subterráneas sujetas a estallidos de rocas es un ejemplo donde las discontinuidades deben ser tomadas en cuenta. Otro ejemplo es la evaluación de la estabilidad dinámica de taludes en roca. En ambos casos, se han hecho esfuerzos para tratar los problemas en forma pseudo dinámica. Sin embargo, las aproximaciones pseudo dinámicas no siempre son interpretables debido a que no entregan indicios sobre la magnitud de las deformaciones o desplazamientos que pueden llegar a desarrollarse. Actualmente están disponibles modelos que incorporan las ecuaciones completas del movimiento y que permiten el cálculo y visualización de los desplazamientos en el tiempo. El conocimiento de los movimientos que resultan de la sollicitación dinámica es una ayuda en la toma de decisiones para el diseño minero.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de los señores Cristián Valdivia (Minera Escondida Limitada) y William Adamson (A.S.P. Blastronics) en la entrega de la información utilizada en las secciones del artículo referentes a tronadura.

REFERENCIAS

1. Housner, G.W. y P.C. Jennings (1964), "Generation of Artificial Earthquakes", *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, 90, 113-150.
2. Joughin, N.C. y A.J. Jager (1984). "Fracture of Rock Stope Faces in South African Gold Mines", Rockbursts: Prediction and Control, *Min. Meta Trans. Inst.* 93, 53-66.
3. Kuhlemeyer, R.L. y J. Lysmer (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *J. Soil Mech & Foundation Div., ASCE*, 99 (SM5), 421-427
4. Mojtahai, N. y S.G. Beattie (1996), "Empirical Approach to Prediction of Damage in Bench Blasting", *Trans. Instn Mn.i Metall. (Sect. A: Min. industry)*, 105, A-75-A80.
5. Seed, H.B. e I. Idriss (1969), "Influence of Soil Conditions on Ground Motion During Earthquakes", *Soil Mech. Found. Div. ASCE*, 95, 99-137.

6. Saragoni, G.R. y G.C. Hart (1974), "Simulation of Artificial Earthquakes," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 2, 249-267.
7. Tinucci, J.P. y A.J.S. Spearing (1993), "Strategies for Clamping Faults and Dykes in High Seismicity Tabular Mining Conditions", en *Rockbursts and Seismicity in Mines (Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, Kingston, Ontario, 16-18 August)*, R.P. Young, Ed. 435-440.