

Enfoque holístico del modelado de fragmentación de una voladura de mina

(por el Dr. Thierry Bernard)

I. Introducción

Predecir los resultados de una voladura de mina. ¿Quién no ha soñado con una herramienta de predicción capaz de hacer tal cosa? El empleo de explosivos produce resultados de los que usualmente se dice que son "impredicibles". Esto se debe sin duda a la característica explosiva de toda detonación y a los efectos devastadores que ésta ocasiona cuando no se ha mantenido bajo control, durante un accidente de manipuleo o producción o, por ejemplo, cuando se los emplea con malas intenciones. Por otro lado, ¿qué sucede en un ambiente controlado como el de una cantera o mina, en donde los explosivos se emplean con propósitos industriales?

Hoy en día, los efectos de una explosión ya no vienen envueltos en un aura de misterio. Se los puede estudiar científicamente. Esto es lo que propone el modelo DNA-Blast, desarrollado después de 15 años de experiencia en el uso de explosivos para romper la roca en minas y canteras. Con el fin de entender la eficiencia de este modelo, lo mejor es empezar por describir su estructura. Muchos científicos, especialistas en voladura, o profesores han contribuido a encontrar la respuesta a la cuestión de modelar los efectos de una explosión. Además, existen muchos tratados, enfoques y ecuaciones que permiten describir este fenómeno. Si bien es cierto que todos éstos han sido, y continúan siendo, útiles para la profesión (e.g. el modelo Kuz-Ram de fragmentación¹, o la ley de vibración de Chapot²), por otro lado no toman en cuenta todos los parámetros que conforman una voladura de mina o, en todo caso, modelan el fenómeno en una configuración que resulta demasiado limitante como para tener un uso operativo. Así, por ejemplo, la secuencia de iniciación está ausente en

¹ Cunningham, C.V.B., 1987: Fragmentation Estimations and the Kuz-Ram Model - Four Years On, in 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, Colorado, 475-487.

² Chapot, P. Study of the vibrations caused by the explosives in the rock solid masses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 1981

prácticamente todos los modelos; sin embargo, el empleo de detonadores electrónicos en la actualidad está altamente difundido y ofrece un número casi infinito de combinaciones.

El software DNA-Blast que se presenta aquí no intenta resolver la cuestión del modelado de los efectos de una explosión mediante una ecuación universal "pura", una especie de Santo Grial conceptual, sino más bien mediante el empleo de un enfoque bastante pragmático. El mecanismo que describe los efectos de una explosión es complejo y se divide en varios mecanismos elementales, cada uno de los cuales se relaciona con los demás mediante enlaces. Por lo tanto, es posible describir el mecanismo global modelando cada uno de los mecanismos elementales (llamados "genes"), así como los enlaces existentes entre ellos.

El modelo, validado con mediciones de la fragmentación o vibración tomadas en el campo de trabajo, según sea el caso, hace posible un nuevo enfoque en el diseño de voladuras gracias, en particular, a su capacidad de "ingeniería inversa". Esto se resume en la expresión "Objetivo a Diseñar", la cual permite que los parámetros de diseño de una voladura se puedan definir para alcanzar un objetivo dado.

II. El Modelo DNA-Blast

Sin entrar en demasiados detalles, la descripción de los efectos de una explosión se puede dividir de la siguiente manera:

1. La carga explota y se convierte en gases de alta presión y alta temperatura.
2. Los gases se aplican al taladro, el cual los contiene y crea un campo de deformación en la roca.
3. Dicho campo, debido a su aspecto impulsivo, crea una onda de deformación que se propaga en la roca y la daña.
4. Este daño constituye el centro de las grietas en la roca.
5. La presión del gas se reduce a través de las grietas separando así los fragmentos de roca.
6. La presión de estos gases aplicada a la cara de los fragmentos, produce fuerzas que los lanzan.
7. Los fragmentos adoptan una trayectoria balística.
8. En áreas donde el daño causado a la roca no resultó suficiente para crear fragmentos, la onda de **deformación** continúa su trayectoria hasta que se queda sin energía, la misma que disipa haciendo que la roca vibre.

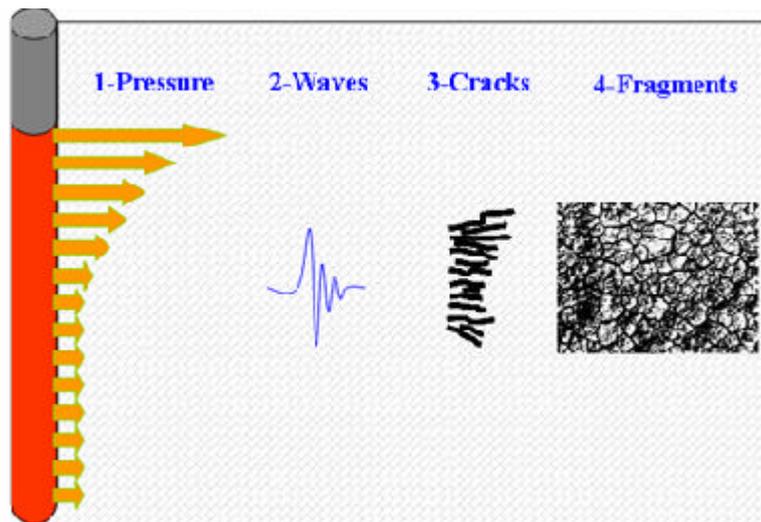


Figura 1 : Mecanismo esquemático del proceso de fragmentación de rocas

Tal como se explica en la introducción, el modelo DNA-Blast se ha elaborado en base a mecanismos elementales (genes), cada uno de ellos describe uno de los aspectos del mecanismo global y todos están unidos por enlaces que explican dichas interacciones.

Al estudiar el mecanismo que se explicó líneas arriba, resulta obvio que al menos con los genes que se describen a continuación, es posible modelar eficientemente los efectos de una explosión:

- Un gene detonante
(que describe la evolución de la presión después de una detonación)
- Un gene de propagación de onda de deformación
(resultado de un campo de presión)
- Un gene de interferencia de onda
(en el caso de varias cargas explosivas)
- Un gene de daño a la roca
(debilitamiento de las características del material de acuerdo a la deformación)
- Un gene de fisuramiento proporcional al daño
- Un gene balístico *(trayectoria de los fragmentos)*

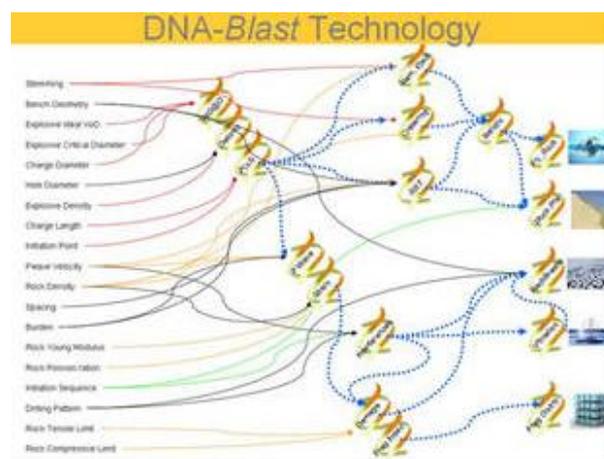


Figura 2 : Representación esquemática de la interacción de los genes

El conocimiento actual de este fenómeno físico nos permite definir estos genes con facilidad.

Todo lo que queda por hacer es modelar la interacción de los genes. Una explosión es un fenómeno dinámico que comienza cuando el especialista en voladura suelta el gatillo de encendido y termina cuando los fragmentos de roca llegan al suelo y éste deja de vibrar. Hemos ido de un estado estable previo a la voladura a un estado estable posterior a la misma, pasando por una sucesión de fenómenos intermedios. Por tanto, el parámetro tiempo es parte de este fenómeno global.

Para tomar este efecto dinámico en consideración, una vez que se ha descrito la interacción de los genes, el modelo trabaja mediante etapas de tiempo elementales. Al final de cada etapa de tiempo, la interacción de los genes se actualiza. Cada nueva etapa de tiempo se lleva a cabo partiendo de la condición inicial del estado de la etapa de tiempo previa. Es así como se modela el aspecto dinámico del fenómeno.

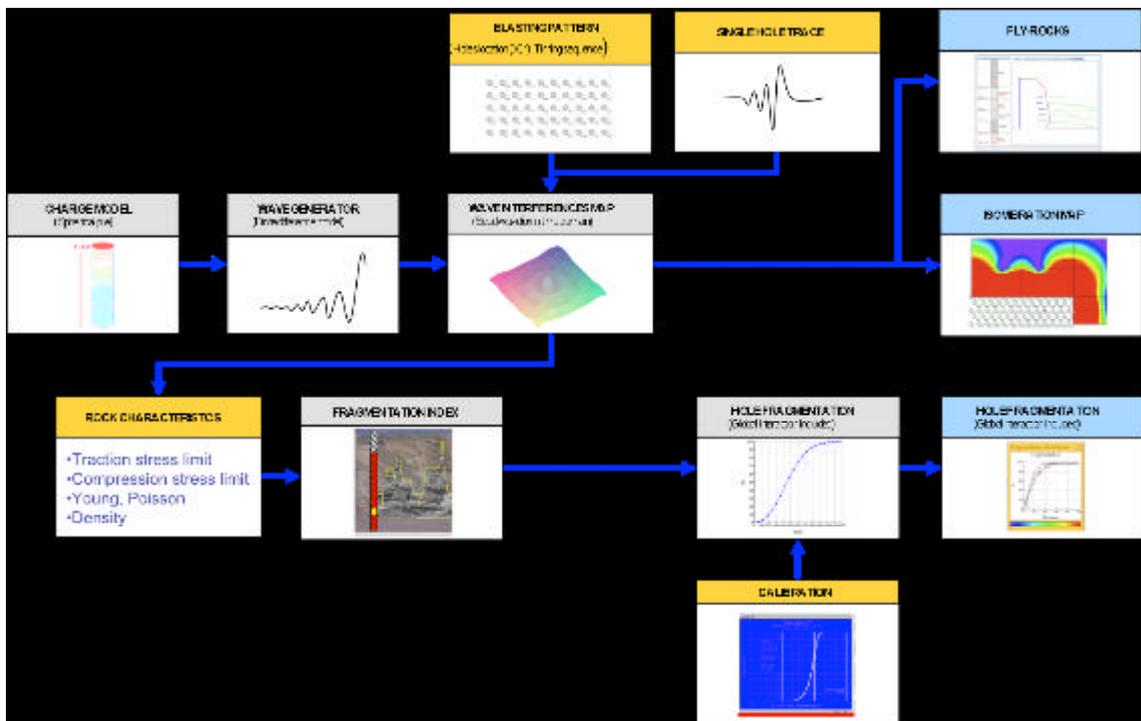


Figura 3 : E estructura del modelo DNA -Blast

III. Modelando la Fragmentación

A. Mecanismo de fragmentación de roca

La fragmentación es el resultado de romper el material en bloques elementales a lo largo de líneas preferenciales frágiles entre los puntos de daño de la matriz rocosa.

Estos puntos de daño son el resultado de las ondas de deformación que se propagan en la roca y, según su intensidad y el estado del material, dañan o destruyen localmente ésta última. La fuerza que separa los fragmentos unos de otros a lo largo de estas líneas la causa la presión del gas, la cual empieza cuando el gas entra en las fisuras y concluye en las caras de los fragmentos.

Por tanto, el mecanismo es muy similar al que emplea un niño cuando corta una silueta en un papel utilizando una aguja. El niño comienza perforando una línea de agujeros en el papel que forman el contorno de la silueta. Esto es equivalente a la onda de deformación que se propaga ocasionando daños (pequeños agujeros) en el material (hoja de papel). Luego, el niño sostiene el papel por cada extremo y con sus manos ejerce fuerza en cada lado del papel. Esto es equivalente a la presión de los gases. La hoja de papel se rompe a lo largo de la línea de agujeros (zona frágil).

De este modo, podemos construir un modelo de fragmentación basándonos en este principio mediante el cual se propaga una onda de deformación, creada por el campo de presión en el taladro perforado en la roca, y definiendo todos los puntos frágiles creados por esta onda. Luego, los enlazamos para definir los bloques así obtenidos. Este método no hace necesario un estudio técnico, ni tampoco presenta problemas de solución digital; sin embargo, con el fin de obtener un resultado realista, requiere de un conocimiento exacto del estado del material que rodea el taladro.

De hecho, los puntos frágiles (agujeros en la hoja de papel) sólo aparecen cuando la onda de deformación pasa puesto que, a escala microscópica, el material no es homogéneo. Al contrario, éste presenta variaciones estructurales, lo que significa que una zona podría resistir, o no, mejor el estado de deformación creado por la onda, que otra zona. Estas variaciones de zona, con distintos grados de resistencia y debilidad, serán la fuente de la red de "agujeros" al interior de la matriz rocosa.

El resultado es que, si bien el mecanismo tal y como lo describimos aquí nos permite modelar la fragmentación teóricamente, es sólo con una medición muy exacta y detallada a escala microscópica del estado mecánico de la roca, que éste se puede aplicar. Ahora sabemos que, si bien es posible en un laboratorio a escala pequeña, hoy en día es imposible llevar a cabo esta medición en un sitio de operaciones o, menos aún, a gran escala.

¿Por todo lo expuesto, deberíamos renunciar al principio de modelar la fragmentación de una voladura?

B. El enfoque del modelo DNA-Blast

¡No necesariamente! El enfoque microscópico de este fenómeno nos muestra que la roca tiene variaciones estructurales distribuidas al azar en la matriz. Aquí, nos enfrentamos a un fenómeno que se puede describir estadísticamente. Es así como describiremos el mecanismo de fragmentación de una matriz rocosa con una onda de deformación.

Tomemos un cubo elemental de material. Sabemos que, cuando se lo observa a través de una lente de aumento, el interior del mismo no es homogéneo y presenta variaciones en su estructura. Sin embargo, cuando se lo observa desde afuera (macro vista), el mismo cubo parece ser homogéneo e incluso isotrópico. Por ejemplo, lo podemos caracterizar con los siguientes valores: Módulo de Young, Ratio de Poisson, así como la resistencia tensional y compresional. Por

lo tanto, debemos encontrar una descripción del daño macroscópico que tome en cuenta el estado microscópico.

Para hacerlo, estudiemos el daño creado por una onda. Una de las mejores comparaciones que describen una onda es, sin duda, las olas del mar. Si observamos las olas rompiéndose contra una pared marina, con el tiempo, éstas dañarán la pared en sus puntos más débiles. Es posible relacionar el daño a la pared marina con diferentes características de las olas:

- La altitud de la ola (amplitud de onda). Amplitudes muy grandes dañarán la pared más rápido. Un amplitud muy grande puede incluso destruirla, de un sólo golpe.
- La repetición de las olas en la pared, o su característica cíclica o alternante (frecuencia de onda). El efecto de golpeado debilita la pared que, con el tiempo, cederá.
- La longitud de cada ola (longitud de onda). Mientras mayor la longitud de la ola, mayor será el tiempo que ésta ejercerá su fuerza sobre la pared marina.

Sugerimos construir el modelo de fragmentación de la roca en base a estas características (amplitud, frecuencia, longitud de onda).

Tomemos un cubo elemental de material y sometámoslo al paso de una onda de deformación por un tiempo "T".

Observemos por un momento dt y el efecto de la parte de la onda que está en el cubo elemental. Esta presenta una amplitud "A", que podemos comparar con el límite de fuerza Sigma (σ_{lim}) de la roca según el estado de la onda.

El índice de fragmentación elemental se define así:

$$if(dt) = \frac{A}{\sigma_{lim}} \text{ if } = 1, \text{ si no } if(dt) = 0$$

y $[If]^{-1} = \sum_{dt=0}^{dt=T} if(dt)$

Se debe tomar nota de que este índice aumenta con el tiempo de aplicación de una onda cuya amplitud es mayor a la resistencia de la roca. Por lo tanto, se puede correlacionar directamente con el número de zonas frágiles creadas (agujeros) por la onda y, consecuentemente, es inverso al tamaño de los fragmentos creados.

El valor $I_f = \left[\sum_{dt=0}^{dt=T} if(dt) \right]^{-1}$ es el valor que retendremos como índice de fragmentación y que se correlaciona directamente al tamaño de los fragmentos que se crearán en el cubo elemental.

¿Cómo vamos del "If" a la distribución blocométrica de un taladro?

El espacio alrededor de un taladro se divide en volúmenes elementales. El tiempo "T" necesario para el paso de la onda de deformación del taladro de voladura se divide en secciones dt .

Por cada volumen elemental (n) calculamos $If(n)$. Después de haber establecido el $If(n)$ desde el más pequeño al más grande, dividimos el rango de valores $[If(n)_{\min}, If(n)_{\max}]$ en intervalos que podemos llamar "clases blocométricas".

El número de valores $If(n)$ por clase representa la distribución blocométrica elemental de un taladro.

Se debe tomar nota de que:

- La escala de las clases blocométricas es completamente arbitraria
- La escala del eje Y está expresada como un porcentaje (%) del número total n de bloques elementales
- El mismo resultado, representado en valores acumulativos, brinda la representación tradicional de una distribución blocométrica.

C. Algunos comentarios sobre el modelo

- 1. Este modelo toma en cuenta todos los parámetros clave de una voladura (calidad del explosivo, geología, posición de los taladros y secuencia de voladura).**

Las características del explosivo (diámetro crítico, velocidad de detonación ideal, densidad, longitud y diámetro de la carga) se toman en cuenta para calcular el campo de presión en el taladro. Las características mecánicas de la roca (Módulo de Young, Ratio de Poisson, resistencia tensional y compresional y densidad), que son necesarias para propagar la onda de deformación, también se incluyen en el modelo.

Para hacer esto se emplea un proceso de cálculo de diferencias finitas, el cual nos permite tomar en consideración las variaciones en las características de la roca en espacio y tiempo. A cada cubo elemental de roca del modelo se le pueden atribuir sus propias características. Por ejemplo: uno de los módulos del software DNA-Blast nos permite especificar la geología que rodea el taladro en base a la bitácora obtenida durante la perforación del mismo.

El modelo empleado para describir la onda de deformación creada por una carga cilíndrica de una extensión finita se basa en la división de dicha carga en cilindros elementales de una longitud que es igual al diámetro del taladro. Para cada carga elemental, se aplica un modelo de la propagación de onda con una fuente esférica. La interacción de las ondas de cada fuente se lleva a cabo por superposición lineal, saltando cada una un período de tiempo igual al diámetro del taladro dividido por la velocidad de detonación.

- 2. Este modelo brinda la distribución blocométrica de cada taladro y nos permite obtener la distribución global de la voladura, así como un cono de dispersión mediante la concatenación de todas las curvas elementales.**

El modelo hace posible obtener la distribución blocométrica de cada taladro (carga explosiva por taladro, geología local y volumen correspondiente definido por su malla de perforación asociada a su tiempo de encendido; debe tomarse nota de que la malla de perforación empleada es real, no teórica, es decir la distancia a la cara libre creada por la detonación de los taladros precedentes). La distribución blocométrica de la voladura se obtiene agregando las distribuciones elementales de cada taladro por clase, luego construyendo la distribución global cumulativa de la voladura.

3. El modelo se puede calibrar fácilmente después, en base a las mediciones del sitio obtenidas con una parte, o toda, la pila de desechos.

El modelo, tal como hemos visto, nos permite obtener una distribución blocométrica a una escala relativa en donde cada taladro cuenta con su propia distribución. Para calibrar el modelo, todo lo que se debe hacer es ajustar la escala horizontal (tamaño de las clases blocométricas) de un taladro o grupo de taladros. Este ajuste se lleva a cabo simplemente alterando el tamaño de la clase más grande; es decir, la clase donde el 100% es del tamaño aceptable. Debemos tomar nota de que K es el coeficiente proporcional entre el tamaño simulado y el tamaño real de la clase más grande.

Asimismo, es posible ajustar con exactitud la forma de la curva para tomar en consideración la no linealidad del mecanismo de fragmentación, si éste último fuese demasiado grande. Para hacerlo, calculamos la función de transferencia

$$F(\text{clase}) = \frac{\text{Distribución Real (clase)}}{\text{Distribución Teórica (clase)}}$$

El conocimiento de estos dos coeficientes K y $F(\text{clase})$ hace posible calibrar el modelo para futuras simulaciones. Se debe hacer hincapié en que esta calibración no modifica la influencia de los parámetros y que se lleva a cabo una vez concluida la simulación. Por lo tanto, no es una desventaja que se pueda

llevar a cabo con posterioridad, pues esto va más de acuerdo a la realidad del área de trabajo: el resultado blocométrico de una voladura sólo se conoce después de haberla realizado y excavado.

4. El modelo toma en consideración la secuencia de iniciación y su influencia en las inferencias de onda

Uno de los aspectos más importantes del modelo es que toma en cuenta la secuencia de iniciación. El modelo de fragmentación de un taladro se basa en los efectos de la onda de deformación que se propaga a través del volumen de roca alrededor de dicho taladro. Por tanto, usted simplemente tiene que reemplazar la onda elemental, de cada taladro, con el resultante de las ondas de toda la voladura en el taladro para obtener la influencia de la secuencia de iniciación en el volumen del taladro en cuestión. Si volvemos a la analogía de la pared marina dañada por la ola, el daño es el resultado de la combinación de todas las olas que reventaron contra dicha pared.

IV. Validación del modelo

La primera pregunta que surge de inmediato cuando se presenta un enfoque como este, es conocer su validez. En otras palabras, ¿las predicciones de un modelo como este son cercanas a la realidad? y, teniendo en cuenta que el modelo tiene sus imperfecciones, ¿qué tanto se desviará de la realidad?

A. Validación del mecanismo (genes)

Cada uno de los genes ha sido validado, procesando resultados de medición al terreno o en laboratorio con fin de garantizar la validez del modelo. Consideramos como validado un gene cual desvío es inferior a un 30% entre valores medidos y simulados.

Tomando en cuenta la estructura específica de este modelo, compuesto de genes, y considerando que ninguno de dichos genes tiene un desvío mayor que

30% frente a valores medidos, podemos concluir que el modelo DNA-Blast tiene tanto sentido como validez.

B. Validación de la predicción de fragmentación

El ejemplo que se muestra a continuación brinda una idea de su grado de validez:

En la mina "A"³, tres voladuras fueron sujeto de un monitoreo especial y toma de medidas de fragmentación in situ gracias a un análisis de imágenes, así como a la revisión "manual" de ciertas partes de la pila de desechos, con el fin específico de perfeccionar la cuantificación de las partículas finas. Debe recalarse que la medición in situ de la fragmentación de estas voladuras se llevó a cabo sólo en una parte de la pila de desechos y no en el volumen total de la misma. Las mediciones se concentraron en las áreas ubicadas en el centro de la voladura. Las distribuciones blocométricas obtenidas son, por tanto, sólo representativas de una parte del volumen roto (volado):

El protocolo de validación del modelo es como sigue:

1. Modelado de la voladura No. 1
2. Calibración del modelo con ayuda de las mediciones tomadas in situ de la voladura No. 1
(La calibración se basa en curvas promedio medidas y simuladas)
3. Modelado de la voladura No. 2 utilizando la calibración obtenida de la voladura No. 1
4. Modelado de la voladura No. 3 utilizando la calibración obtenida de la voladura No. 1
5. Comparación de los resultados modelados y medidos para la voladura No. 2

³ Por razones de confidencialidad, los nombres de las minas se han reemplazado por letras

6. Comparación de los resultados modelados y medidos para la voladura No. 3

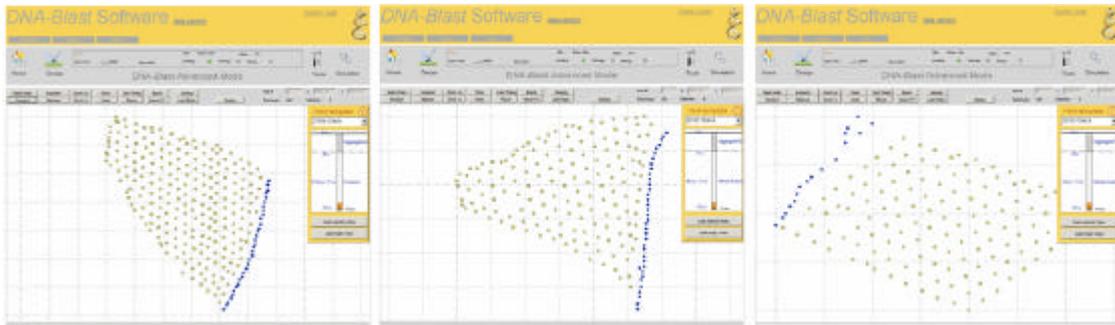


Figura 4: Las tres voladuras importadas en el software DNA-Blast

Los gráficos líneas abajo representan, respectivamente, la distribución blocométrica de los valores medidos (líneas punteadas) y simulados.

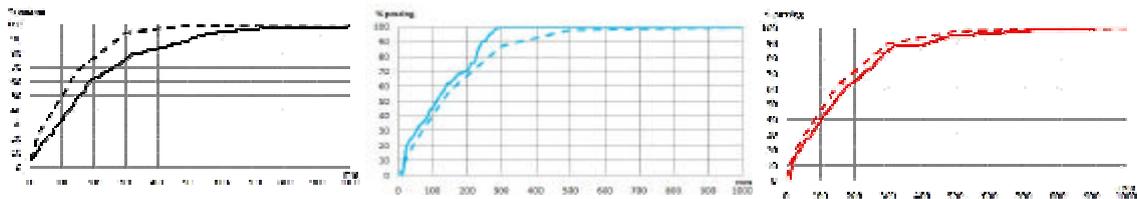


Figure 5: Distribución blocométrica de la voladura No. 1, 2 y 3

Cuando se analiza el efecto de la calibración (obtenido de los valores promedio medidos) de los valores altos y bajos de la distribución simulada, notamos que las curvas son muy similares y la diferencia en el porcentaje del rango del tamaño de los fragmentos es menos de 10% entre dos voladuras consecutivas.

Esta diferencia se confirma con la simulación de las voladuras No. 2 y No. 3, comparadas con los valores medidos de los valores altos y bajos de la distribución; de hecho, es menor (8%) para el valor promedio. Esta desviación es muy aceptable, puesto que los valores medidos no representan toda la pila de desechos. Por lo tanto, el modelo queda validado y brinda resultados sin precedentes.

V. Un ejemplo de aplicación para el modelo DNA-Blast : comparar productos

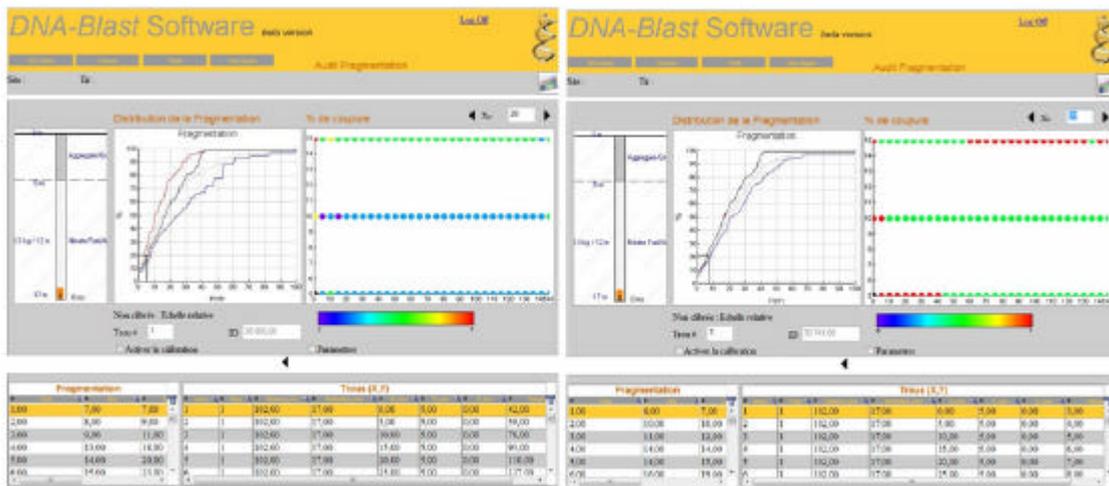
Una simulación digital con un resultado confiable es una herramienta que, por ejemplo, permite tomar decisiones estratégicas explorando las distintas configuraciones sin tener que llevar a cabo pruebas in situ, las mismas que son costosas pues requieren de varios instrumentos para comparar los resultados. Por lo tanto, el proceso tradicional de prueba y error se puede eliminar de modo que aquellas configuraciones que a veces son riesgosas, o que podrían resultar peligrosas, se pueden evitar.

El ejemplo que se presenta más adelante muestra cómo el modelo DNA-Blast se puede emplear para obtener una idea del uso que podrían brindar los detonadores electrónicos si reemplazaran a detonadores del tipo no eléctrico, con las configuraciones especiales de un sitio dado.

Supongamos que deseamos estudiar la fragmentación; es decir, estar en condiciones de cuantificar con precisión la diferencia en porcentaje a un tamaño menor a 250 mm, considerando las características precisas de la roca, el explosivo utilizado, el diámetro de los taladros, etc.

Para hacerlo, se empleó una configuración típica de voladura de 6 filas de 30 taladros.

En el primer caso, se utilizaron detonadores no eléctricos, con una secuencia de iniciación típica de 17 ms entre taladros de una misma fila, y 42 ms entre filas. Para detonadores electrónicos, se utilizará la llamada secuencia de iniciación de "tiempo corto" de 1 ms entre taladros de una misma fila y 3ms entre filas.



17 ms x 42 ms

1 ms x 3 ms

Figure 6: Comparando tecnologías de iniciación non-eléctrica y electrónica

Las simulaciones muestran un incremento del 4% en el porcentaje del tamaño menor a 250 mm, en el caso de detonadores electrónicos, y una disminución de la desviación entre el más grande y el más pequeño, de 28%. En otras palabras, la uniformidad de la fragmentación es mucho mejor.

Ahora todo lo que queda por decidir es si esta desviación, una vez cuantificada, justifica la elección de un sistema de iniciación electrónica o no.

VI. Conclusión

El modelado de los efectos de una voladura de mina, algo con lo que todos hemos soñado por largo tiempo, es ahora una realidad. El Software DNA-Blast modela los efectos globales de una voladura, en base a una serie de mecanismos elementales (genes) interconectados por sus parámetros físicos comunes y tomando en cuenta el tiempo.

En consecuencia, el modelo ofrece un enfoque al mecanismo de fragmentación de roca a la vez que modela simultáneamente los efectos secundarios tales como la vibración, proyecciones o sobre rotura.

Las simulaciones hechas han sido validadas con configuraciones reales. Sólo se desvían de los valores medidos por un escaso porcentaje, lo cual nos hace pensar que el modelo es confiable y útil.

Hoy en día, el Software DNA-Blast constituye un modelo único que toma en cuenta todos los parámetros clave de una voladura de mina: geología, malla de perforación, carguío de taladros conjuntamente con la calidad del explosivo y del taco de contención y, sobre todo, la secuencia de iniciación o encendido, la misma que constituye una ausencia importante en los modelos actuales.

Esto abre nuevos horizontes para la optimización de voladuras. Por tanto, cada especialista en voladura, supervisor de turno o gerente puede ahora evaluar los efectos de la configuración de una voladura en términos de su resultado técnico o seguridad, así como de su impacto financiero, todo con sólo unos cuantos "clicks" en Internet.

La ventaja final del modelo DNA-Blast es su formato digital, lo que permite enlazar los resultados de la voladura con los parámetros clave de su diseño, todo esto haciendo que sea posible llevar a cabo simulaciones inversas. En otras

palabras, se empieza por los resultados esperados (fragmentación, vibración, rocas volantes, etc.), para definir los parámetros de implementación inicial (secuencia de iniciación, malla de perforación, taco de contención, etc.).

El "Objetivo a Diseñar" es, sin duda, el ángulo más fascinante del modelo DNA-Blast, el mismo que se explicará en más detalle en un próximo artículo.

VII. Bibliografía

Bernard, Thierry. "Control of Explosive Energy : Action of the explosive on the surrounding area". Thesis, Institut de Geodynamique URA-CNRS, 1995

Borg, D. "Emulsion explosive Technology" 5th High-Tech Seminar on Blasting Technology, Instrumentation and explosives Applications, 1994

Brent, G. "Studies On the effect of burden on Blast Damage" - Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.6 #2, 2002

Chapot, P. Study of the vibrations caused by the explosives in the rock solid masses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1981

Chiapetta, R.F. "The use oh High-Speed motion-picture photography in evaluating blast design", 6-10 sept. 1993

Chiapetta, R.F., M. Hammele. "Analytical High Speed Photography to evaluate air decks, stemming retention and gas confinement" - 1st Annual High-Tech Seminar – State-of-the-art Blasting Technology Instrumentation and applications, 1989

Cunnigham, C.V.B., "Fragmentation Estimations and the Kuz-Ram Model" - Four Years On, in 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, Colorado, pp. 475-487, 1987

Dumay, Daniel. "EXPLO2D - Study and development of the thermodynamic aspects", 1992

Euvrard, Daniel. "Numerical resolution of the partial derivative equations of physics, mechanics and engineerings: Finite differences, finite elements, problems in not limited fields".

Favreau, R.F., "Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity." Journal of Geophysical Research, vol. 74, p. 4267, 1969

Floyd, J. "Rockmass response quantification". Daveyfire, Inc.- Weaverland Quarry, Jun. 2001

Hadamard, Jacques. Lessons on the wave propagation, 1903

Hamdi, E., J. du Mouza, J.A. Fleurisson. "Blasting Energy and Rock Mass Fragmentation" *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.5 #3, p.183, 2001

Holmberg R., P-A. Persson. 'Constants for Modelling' *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.8 #2, 2004

Holsapple, K. A., "Impact crater scaling laws". NASA Tech. Memo., NASA TM-89810, p. 392-393, May 1987

Liard, Jean-Jacques. "Efficiency of the stemming in blast-holes", 1993

Onederra, I. "A fragmentation modelling Framework." *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.8 #3, p.195, 2004

Onederra, I., S. Sesen. "Selection of inter-hole and inter-row timing for surface blasting - an approach based on burden relief analysis"

Ouchterlony, F., S. Nie, U. Nyderg, J. Deng. "Monitoring of large open cut rounds" *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.1 #1, 1997

Persson, P.A., R. Homberg, J. Lee. Rock Blasting & Explosives Engineering. Chapter 11 : Blast Performance Control, p.306+, Chapter 4 : Shock Waves and Detonations, Explosive Performance, p.128+

Rossmannith, H.P. "The Mechanics and physics of advanced blasting-waves, shocks, fracture, damage, impact and profit" – Short Course *FragBlast8*, May 2006

Rossmannith, H.P., K. Uenishi. "One-Dimensional block model for bench blasting." *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.4 #3-4, 2000

Rossmann, H.P., A. Daehnke, J.F. Schatz. "On dynamic gas pressure induced fracturing." *Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation*, vol.1 #1, 1997

Schmidt & Housen, "Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering" *Int. J. Impact Engr.* 5: 543-60, 1987.

Segarra, P., J.A. Sanchidrián, L.M. López, J.A. Pascual, R. Ortiz, A. Gómez & B. Smoech. "Analysis of bench face movement in quarry blasting." *Explosives and Blasting Technique*, Holmberg ed.

Souers, P.C. R. Garza, "Size effect and Detonation Front Curvature." The tenth American Physical Society topical conference on shock compression of condensed matter. *AIP Conference Proceedings*, Volume 429, pp. 325-328, 1998.

Tosello R., "Shock Waves & Detonation Waves" Detonic courses ISITV, 2005-2006

Vanbrabant, F. "Modelamiento Interaccion de Ondas." *Jornadas de Tronadura*, 2001