

**MODELADO DE DESPLAZAMIENTO POR VOLADURAS UTILIZANDO PARTICIÓN
DE ENERGÍA**

APLICACIONES RELACIONADAS

5

Esta solicitud reclama la prioridad de la solicitud de los EE. UU. núm. 18/484.130, presentada el 10 de octubre de 2023, y titulada "Blast Heave Modeling Utilizing Energy Partitioning", y la solicitud provisional de los EE. UU. núm. 63/379.621, presentada el 14 de octubre de 2022, y titulada "Blast Heave Modeling Utilizing Energy Partitioning", cada una de las cuales se incorpora de esta manera como referencia en su totalidad.

10

CAMPO TÉCNICO

15

La presente descripción se relaciona generalmente con explosivos. Más específicamente, la presente descripción se relaciona con métodos, sistemas, y aparatos para diseñar un plan de voladuras.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

20

Para identificar fácilmente la descripción de cualquier elemento o acción particular, el dígito o dígitos más significativos en un número de referencia se refieren al número de figura en la que ese elemento se introduce por primera vez.

25

La Figura 1 ilustra un elemento distinto avanzado para simulaciones de voladuras de acuerdo con una modalidad.

La Figura 2 ilustra una técnica de detección de contacto de arco a arco que puede ser usada por un sistema de modelado para determinar el contacto entre arcos de elementos vecinos de acuerdo con una modalidad.

La Figura 3 ilustra una técnica de detección de contacto de arco a línea de acuerdo con una modalidad.

La Figura 4 ilustra una manera de detectar el contacto de línea a línea usando la técnica de contacto de arco a línea de acuerdo con una modalidad

5 La Figura 5 ilustra un cálculo de fuerza que un sistema de modelado puede usar para determinar una fuerza aplicada a un elemento distinto avanzado por elementos en contacto de acuerdo con una modalidad.

La Figura 6 ilustra un cálculo de momento para determinar un momento aplicado al elemento distinto avanzado por elementos en contacto de acuerdo con una
10 modalidad.

La Figura 7 ilustra una variedad de formas de elementos potenciales de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 8 es un gráfico de un adiabático ilustrativo para una explosión.

La Figura 9 ilustra un diagrama de flujo para un método de elementos
15 discretos de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 10 ilustra una simulación usando elementos de GEM de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 11 es un cuadro que muestra el banco sondeado y perfil de rezaga así como el banco y perfil de rezaga predicho de GEM de acuerdo con algunas
20 modalidades.

La Figura 12 es un cuadro que ilustra la consistencia de las velocidades de cara predichas de GEM entre simulaciones con elementos circulares y hexaédricos de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 13 ilustra una voladura modelada con elementos tanto circulares
25 como hexagonales de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 14 ilustra un modelo usando elementos de GEM de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 15 ilustra una simulación del modelo de la Figura 13 usando partición de energía de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 16 ilustra un modelo de mina de acuerdo con algunas modalidades.

5 La Figura 17 ilustra una tabla de los cuatro explosivos diferentes.

La Figura 18 muestra una tabla que incluye tipos de roca genéricos usados para la simulación del modelo de la Figura 16.

La Figura 19 ilustra una tabla con variables de entrada de ejemplo para los cálculos de simulación para el modelo en la Figura 16 de acuerdo con algunas
10 modalidades.

La Figura 20 ilustra una tabla del desplazamiento (*heave*) calculado para cuatro explosivos en dos tipos de roca.

La Figura 21 ilustra un gráfico que representa los efectos de explosivo y roca en la proyección.

15 La Figura 22 ilustra un gráfico que muestra el efecto que tiene el tipo de roca en el porcentaje de proyección para ANFO.

La Figura 23 ilustra un gráfico de porcentaje de proyección vs. velocidad de cara para dos tipos de roca.

20

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Los explosivos se usan comúnmente en las industrias de minería, canteras y excavación para romper rocas y minerales. Generalmente, un agujero, denominado “barreno”, se perfora en una superficie, tal como el suelo. Después pueden colocarse
25 explosivos dentro del barreno. Típicamente, se usan múltiples barrenos para romper grandes cantidades de rocas y minerales. El uso de múltiples barrenos introduce complejidades para planificar una voladura. Por ejemplo, una voladura puede variar basada en una pluralidad de factores que incluyen la separación entre barrenos, el *burden*

de los barrenos, la profundidad del barreno, el patrón de los barrenos, el número de barrenos, las propiedades geológicas, el tipo de explosivo, la cantidad de explosivo, y el tiempo de iniciación del barreno. El número de posibilidades dificulta la planificación de voladuras, incluso para un ingeniero altamente capacitado en voladuras.

5 Pueden usarse simulaciones de voladuras realizadas por sistemas de modelado para predecir un resultado de una voladura. Los sistemas de modelado simulan una voladura para predecir el movimiento de rocas y el desplazamiento inducido por la voladura. Los sistemas de modelado de voladuras pueden usarse para determinar la ubicación del mineral en una pila de rezaga final después de que ocurre una voladura para
10 ayudar con la gestión de minerales para la eliminación del mineral de desecho y la minimización de la mezcla de mineral de desecho y mineral objetivo. Una voladura eficiente puede optimizarse en una roca específica eligiendo el explosivo correcto basándose en las simulaciones de voladuras. La elección y el patrón de los explosivos pueden estar basados en las características de la roca y los resultados deseados de la
15 voladura en términos de fragmentación y desplazamiento.

 Algunos sistemas de modelado de voladuras usan elementos distintos para simular una voladura. Los sistemas de modelado de elementos distintos generan un ensamblaje de elementos para representar un sitio de voladura y hacer el seguimiento del movimiento de los elementos a través del tiempo para simular una
20 voladura. El movimiento del elemento individual es causado por fuerzas aplicadas al ensamblaje y también usualmente por la gravedad.

 Algunos sistemas de modelado usan elementos circulares para representar rocas. Puede usarse un ensamblaje de elementos circulares bidimensionales que se mueven a través del tiempo debido a una carga explosiva y la gravedad para
25 simular una voladura. Los círculos son muy eficientes computacionalmente porque el contacto entre partículas puede ser determinado comparando la distancia entre los dos centros de círculos con la suma de los radios de los círculos. No obstante, los elementos circulares simplifican en exceso las masas rocosas lo que provoca una pérdida de

precisión en la simulación. Por ejemplo, los elementos circulares no generan fricción entre los elementos ni interactúan entre sí de la misma manera en que lo harían las masas rocosas desiguales. Otro desafío asociado con elementos distintos esféricos es que no tienen relación de aspecto y, por lo tanto, están limitados en la predicción del abultamiento o la creación de porosidad en un ensamblaje de elementos distintos esféricos. Por lo tanto, los elementos circulares no representan con precisión el abultamiento que puede ocurrir en la pila de rezaga final después de la voladura.

Algunos sistemas de modelado emplean elementos distintos de lados rectos tales como elementos cuadriláteros o elementos triangulares para representar masas rocosas. Un elemento distinto de lado recto es una serie de líneas conectadas entre sí para formar un contorno de una forma con un conjunto de esquinas angulares. Un sistema que usa elementos de lado recto proporciona una simulación más precisa que un sistema que usa elementos circulares. Por ejemplo, los elementos distintos de lados rectos pueden tener relaciones de aspecto a diferencia de los elementos circulares. Sin embargo, la detección del contacto entre elementos de lados rectos (p. ej., contacto entre una esquina de un primer elemento y un lado de un segundo elemento, contacto entre una esquina de un segundo elemento y un lado de un primer elemento, y contacto entre un lado de un primer elemento y un lado de un segundo elemento) es un proceso muy complejo y computacionalmente intensivo. Además, las simulaciones que usan estos tipos de elementos distintos requieren órdenes de magnitud de más tiempo de cálculo para completarse que las simulaciones que emplean elementos esféricos. Además, los elementos de lado recto tienden a ser demasiado rígidos, son demasiado voluminosos y no representan muy bien el comportamiento del flujo rocoso.

Algunas modalidades en la presente descripción usan elementos distintos con un paradigma geométrico avanzado para representar el movimiento de roca volada en una simulación de voladura. El movimiento de elementos geológicos (GEM, por sus siglas en inglés) es una capacidad del Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés) para la simulación del desplazamiento inducido por

voladura con un algoritmo computacional muy rápido que puede tratar eficientemente muchas formas de elementos diferentes. Los elementos de GEM (también denominados en la presente descripción elementos distintos avanzados) se crean mediante la utilización de arcos y líneas alternos.

5 Los elementos de GEM comprenden geométricamente arcos y líneas que definen el contorno del elemento distinto individual. Cada línea está conectada por medio de los arcos de tal manera que las líneas no se intersecan. En su lugar, los arcos y las líneas se usan para crear un elemento distinto bidimensional con uno o más lados rectos y esquinas redondeadas. Las esquinas redondeadas pueden estar formadas con uno o
10 más arcos. Estos elementos de GEM mejoran la precisión de una simulación en comparación con los elementos circulares y son más eficientes computacionalmente que los elementos distintos de lados rectos.

Aunque son posibles formas de GEM complejas, el modelado de voladuras requiere que los elementos representen un terreno sólido con un mínimo
15 de vacío en la matriz de elementos. Por lo tanto, los modelos de desplazamiento por voladura de GEM pueden crearse a partir de formas de elementos empaquetables tales como hexaedros, cuadriláteros, pentágonos, triángulos, y círculos. Los hexaedros, cuadriláteros, y círculos pueden utilizarse para representar roca volada.

Algunas modalidades incluyen la capacidad de definir el tamaño del radio
20 de esquina redondeada así como la longitud de los lados para elementos cuadriláteros y hexaédricos. Los círculos pueden crearse a partir de un elemento cuadrilátero con lados de longitud cero y cuatro arcos.

La carga de gas del explosivo de elementos de GEM puede lograrse empleando la ecuación de estado (EOS, por sus siglas en inglés) de Noble-Abel, que
25 es única para cada formulación de explosivo. Se han desarrollado características de EOS de Noble-Abel para cuarenta formulaciones de explosivos diferentes pertinentes para voladuras. Estas formulaciones incluyen nitrato de amonio/fueloil (ANFO, por sus siglas en inglés), emulsiones de solo AN, emulsiones de sales duales (AN + SN) y

mezclas de ANFO con emulsiones de solo AN. La densidad o bien no está modificada (es decir, mezclas) o está controlada por gases químicos o microbalones (plástico y vidrio).

Las simulaciones de explosivos pueden calcular el movimiento de la roca a partir de un conocimiento de la presión del gas que mueve los elementos. La simulación puede usar una expresión para la presión vs. volumen, o el adiabático, de los gases producto de la explosión. Este trabajo usa una expresión analítica para el adiabático que se deriva de las propiedades del explosivo. El efecto de la presión de detonación del explosivo al triturar un anular de roca, y establecer una onda de choque, puede denominarse “brisancia” (poder rompedor). Algunas modalidades pueden incorporar un efecto deletéreo de brisancia en el movimiento subsiguiente de las rocas.

Algunas modalidades pueden emplear partición de energía entre la brisancia, la fragmentación y el desplazamiento. Esta partición basada en la física puede proporcionar un modelado preciso de los resultados de voladuras en una amplia gama de tipos de rocas y tipos de explosivos. Define con precisión el estado volumétrico, de presión y energía de los gases de explosivos en un barreno después de una detonación. Pueden incluirse en los cálculos las propiedades mecánicas de la roca y las características del explosivo. Adicionalmente, algunas modalidades proporcionan métodos para predecir mejor el desplazamiento.

Aunque muchas de las modalidades en la presente descripción describen la partición de energía en relación con el modelado de elementos discretos (p. ej., GEM), la partición de energía puede usarse en combinación con otras técnicas de simulación. Por ejemplo, la partición de energía puede usarse en el modelado de fragmentación. La partición de energía puede usarse para determinar la energía del explosivo, el tipo de explosivo, y/o la densidad del explosivo para un resultado deseado.

Se entenderá fácilmente que los componentes de las modalidades como se describe generalmente más abajo y se ilustra en las figuras en la presente descripción podrían disponerse y diseñarse en una amplia variedad de configuraciones diferentes. Por ejemplo, las etapas de un método no necesariamente necesitan ejecutarse en ningún orden específico, ni siquiera secuencialmente, ni las etapas necesitan ejecutarse solo una vez. Por lo tanto, la siguiente descripción más detallada de diversas modalidades, como se describe más abajo y se representa en las figuras, no pretende limitar el alcance de la descripción sino que es simplemente representativa de diversas modalidades. Si bien los diversos aspectos de las modalidades se presentan en las figuras, las figuras no están necesariamente dibujadas a escala a menos que se indique específicamente.

Las modalidades e implementaciones de los sistemas y métodos de planificación de voladuras descritos en la presente pueden incluir diversas etapas, que pueden incorporarse en instrucciones ejecutables por máquina para ser ejecutadas por un sistema informático. Un sistema informático puede incluir una o más computadoras de propósito general o de propósito especial (u otros dispositivos electrónicos). El sistema informático puede incluir componentes de hardware que incluyen lógica específica para realizar las etapas o puede incluir una combinación de hardware, software, y/o firmware.

Las modalidades pueden proporcionarse como un producto de programa informático que incluye un medio legible por computadora que tiene almacenadas en este instrucciones que pueden usarse para programar un sistema informático u otro dispositivo electrónico para realizar los procesos descritos en la presente. El medio legible por computadora puede incluir, pero no se limita a: discos duros, disquetes flexibles, discos ópticos, CD-ROM, DVD-ROM, ROM, RAM, EPROM, EEPROM, tarjetas magnéticas u ópticas, dispositivos de memoria de estado sólido, u otros tipos de medios/medios legibles por computadora adecuados para almacenar instrucciones electrónicas.

Los sistemas informáticos y las computadoras en un sistema informático pueden estar conectados por medio de una red. Las redes adecuadas para la configuración y/o uso como se describe en la presente incluyen una o más redes de área local, redes de área extensa, redes de área metropolitana, y/o redes de Internet o IP, tales como la World Wide Web, una Internet privada, una Internet segura, una red de valor agregado, una red privada virtual, una extranet, una intranet, o incluso máquinas independientes que se comunican con otras máquinas mediante transporte físico de medios. En particular, una red adecuada puede formarse a partir de partes o la totalidad de otras dos o más redes, que incluyen redes que usan hardware y tecnologías de comunicación de red dispares.

Una red adecuada incluye un servidor y varios clientes; otras redes adecuadas pueden contener otras combinaciones de servidores, clientes, y/o nodos punto a punto, y un sistema informático dado puede funcionar tanto como cliente o como servidor. Cada red incluye al menos dos computadoras o sistemas informáticos, tales como el servidor y/o los clientes. Un sistema informático puede incluir una estación de trabajo, computadora portátil, computadora móvil desconectable, servidor, mainframe, clúster, los así denominados “computadora de red” o “cliente liviano”, computadora de tableta, teléfono inteligente, asistente digital personal u otro dispositivo informático sostenido con la mano, dispositivo o aparato electrónico “inteligente” de consumo, dispositivo médico, o una combinación de estos.

Las redes adecuadas pueden incluir software de comunicaciones o de conexión en red, tal como el software disponible de Novell®, Microsoft®, y otros proveedores, y pueden operar usando TCP/IP, SPX, IPX, y otros protocolos a través de cables de par trenzado, coaxial, o de fibra óptica; líneas telefónicas; ondas de radio; satélites; relés de microondas; líneas de energía de CA moduladas; transferencia de medios físicos; y/u otros “cables” de transmisión de datos conocidos para los expertos en la técnica. La red puede abarcar redes más pequeñas y/o ser conectable a otras redes a través de una puerta de enlace o un mecanismo similar.

Cada sistema informático incluye uno o más procesadores y/o memoria; los sistemas informáticos también pueden incluir diversos dispositivos de entrada y/o dispositivos de salida. El procesador puede incluir un dispositivo de propósito general, tal como un procesador Intel®, AMD®, u otro microprocesador “disponible en el mercado” (OTS, por sus siglas en inglés). El procesador puede incluir un dispositivo de procesamiento de propósito especial, tal como ASIC, SoC, SiP, FPGA, PAL, PLA, FPLA, PLD, u otro dispositivo personalizado o programable. La memoria puede incluir RAM estática, RAM dinámica, memoria flash, uno o más biestables (*flip-flops*), ROM, CD-ROM, disco, cinta, magnética, óptica, u otro medio de almacenamiento informático. El(los) dispositivo(s) de entrada puede(n) incluir un teclado, mouse, pantalla táctil, lápiz óptico, tableta, micrófono, sensor, u otro hardware con el firmware y/o software que lo acompaña. El(los) dispositivo(s) de salida puede(n) incluir un monitor u otra pantalla, impresora, sintetizador de voz o texto, conmutador, línea de señal, u otro hardware con el firmware y/o software que lo acompaña.

Los sistemas informáticos pueden ser capaces de usar una unidad de disquete, una unidad de cinta, una unidad óptica, una unidad magneto-óptica, u otros medios para leer un medio de almacenamiento. Un medio de almacenamiento adecuado incluye uno magnético, óptico, u otro dispositivo de almacenamiento legible por computadora que tiene una configuración física específica. Los dispositivos de almacenamiento adecuados incluyen disquetes, discos duros, cintas, CD-ROM, DVD, PROM, RAM, memoria flash, y otros dispositivos de almacenamiento de sistemas informáticos. La configuración física representa datos e instrucciones que hacen que el sistema informático opere de una manera específica y predefinida como se describe en la presente.

El software adecuado para ayudar en la implementación de la invención es fácilmente proporcionado por los expertos en la(s) técnica(s) pertinente(s) usando las enseñanzas presentadas aquí y lenguajes y herramientas de programación, tales como Fortran Moderno, Java, Pascal, C++, C, PHP, .Net, lenguajes de base de datos,

API, SDK, lenguaje ensamblador, firmware, microcódigo, y/u otros lenguajes y herramientas. Los formatos de señal adecuados pueden incorporarse en forma análoga o digital, con o sin bits de detección y/o corrección de errores, encabezados de paquetes, direcciones de red en un formato específico, y/u otros datos de soporte
5 fácilmente proporcionados por los expertos en la(s) técnica(s) pertinente(s).

Los aspectos de ciertas modalidades pueden implementarse como módulos o componentes de software. Como se usa en la presente descripción, un módulo o componente de software puede incluir cualquier tipo de instrucción informática o código ejecutable por computadora ubicado dentro de o en un medio de almacenamiento legible
10 por computadora. Un módulo de software puede, por ejemplo, comprender uno o más bloques físicos o lógicos de instrucciones informáticas, que pueden organizarse como una rutina, programa, objeto, componente, estructura de datos, etc., que realiza una o más tareas o implementa tipos de datos abstractos particulares. Un módulo de software particular puede comprender instrucciones dispares almacenadas en diferentes
15 ubicaciones de un medio de almacenamiento legible por computadora, que juntos implementan la funcionalidad descrita del módulo. De hecho, un módulo puede comprender una única instrucción o muchas instrucciones, y puede distribuirse sobre varios segmentos de código diferentes, entre diferentes programas, y a través de varios medios de almacenamiento legibles por computadora.

20 Algunas modalidades pueden practicarse en un entorno informático distribuido donde las tareas son realizadas por un dispositivo de procesamiento remoto conectado a través de una red de comunicaciones. En un entorno informático distribuido, los módulos de software pueden estar ubicados en medios de almacenamiento de información legibles por computadora locales y/o remotos.
25 Además, los datos que se vinculan o se renderizan juntos en un registro de base de datos pueden residir en el mismo medio de almacenamiento legible por computadora, o en varios medios de almacenamiento legibles por computadora, y pueden estar vinculados entre sí en campos de un registro en una base de datos a través de una

red. De acuerdo con una modalidad, un sistema de gestión de bases de datos (DBMS, por sus siglas en inglés) permite a los usuarios interactuar con una o más bases de datos y proporciona acceso a los datos contenidos en las bases de datos.

Se ha desarrollado una nueva técnica de elementos discretos que
5 supera el comportamiento simplificado de los elementos circulares, es considerablemente más eficiente computacionalmente que los elementos rectangulares y exhibe un comportamiento de flujo más representativo de la roca volada. Como se ilustra en la Figura 1, se crea un elemento de GEM bidimensional al encerrar el espacio con una serie de arcos y líneas. También muestra la estructura de
10 datos para definir las líneas y arcos que constituyen el elemento.

La Figura 1 ilustra un elemento distinto avanzado 100 de acuerdo con una modalidad. Un sistema de modelado de elementos distintos segmenta usando el elemento distinto avanzado 100 que segmenta un modelo de sitio bidimensional en una pluralidad de elementos. El elemento distinto avanzado 100 tiene una forma
15 formada conectando puntos finales de una o más líneas con arcos de tal manera que los puntos finales de las dos o más líneas se acoplan indirectamente por medio de los arcos y los arcos forman esquinas redondeadas de la forma. La modalidad ilustrada del elemento distinto avanzado 100 comprende una primera línea 102, una segunda línea 104, y una tercera línea 132 conectadas por cuatro arcos (es decir,
20 primer arco 114, segundo arco 122, tercer arco 110, y cuarto arco 118).

La modalidad ilustrada incluye dos líneas paralelas. Otras modalidades pueden presentar una o más líneas y las líneas pueden estar en una relación angular entre sí. Cada línea comprende dos puntos finales, y cada punto final está conectado a un arco de tal manera que la forma presenta esquinas o bordes
25 redondeados. Cada esquina redondeada puede crearse usando uno o más arcos. Por ejemplo, una esquina redondeada o borde redondeado se crea conectando el primer arco 114 y el segundo arco 122.

Cada arco es una curva diferenciable. En la modalidad ilustrada, los arcos son arcos circulares que delinean una parte de una circunferencia de un círculo. La modalidad ilustrada incluye cuatro arcos. Otras modalidades pueden incluir un número diferente de arcos. Cada arco comprende un punto central de arco (es decir, primer punto central 126, segundo punto central 128, tercer punto central 130, y cuarto punto central 124). Los puntos centrales de arcos representan un punto equidistante de todos los puntos en el arco circular. Cada arco comprende además un radio (es decir, primer radio 112, segundo radio 116, tercer radio 120, y cuarto radio 106). Debido a que los arcos son circulares, el radio de cada arco es el mismo a lo largo de todos los puntos del arco. Adicionalmente, cada arco comprende un ángulo de arco (p. ej., tercer ángulo de arco 108). El ángulo de arco es el ángulo formado por el arco en el punto central. Como se ilustra, los puntos finales de los arcos pueden conectarse a otro arco como se muestra mediante la conexión entre el primer arco 114 y el segundo arco 122, o los puntos finales de los arcos pueden estar conectados a líneas como se muestra mediante las conexiones entre la primera línea 102 y el tercer arco 110.

Las intersecciones entre arcos y líneas y las intersecciones entre arcos y arcos forman transiciones suaves entre los diferentes elementos del contorno de la forma. Cada línea puede ser tangencial al punto final del arco al que está conectada para suavizar la transición. Similarmente, las transiciones de arco a arco pueden realizar una transición suave. Las intersecciones no forman ángulos agudos como se forma cuando dos líneas rectas se conectan directamente y forman un vértice. La forma resultante presenta un contorno con esquinas redondeadas en lugar de una forma con esquinas en ángulo. Por lo tanto, las líneas del elemento distinto avanzado 100 no están conectadas directamente, sino que más bien se acoplan indirectamente por medio de los arcos, para evitar las esquinas angulares. Las esquinas redondeadas son computacionalmente más eficientes que las esquinas de ángulos agudos y pueden crearse usando uno o más arcos.

El elemento distinto avanzado 100 se crea a partir de arcos y líneas que definen el contorno del elemento distinto individual. La Figura 1 ilustra una de las muchas formas de elementos posibles que pueden crearse a partir de arcos y líneas. Otras modalidades de un elemento distinto avanzado pueden usar arcos y líneas para crear otras formas no esféricas sin esquinas angulares. Otras formas que pueden crearse usando una combinación de arcos y líneas incluyen polígonos con esquinas redondeadas tal como un triángulo con esquinas redondeadas, un trapecioide con esquinas redondeadas, un rectángulo con esquinas redondeadas, un cuadrado con esquinas redondeadas, un hexágono con esquinas redondeadas, o un octógono con esquinas redondeadas.

En algunas modalidades, la forma usada para elementos de un modelo de simulación puede estar basada en datos geológicos tales como la dureza de la roca. En algunas modalidades, al menos algunos de los elementos son formas diferentes. Por ejemplo, pueden modelarse diferentes tipos de rocas usando diferentes formas de elementos. Por ejemplo, el carbón puede modelarse con un cuadrilátero redondeado y otra roca en la misma simulación puede modelarse con un hexaedro redondeado. En algunas modalidades, al menos algunos de los elementos de una misma forma son de diferentes tamaños.

Las formas de elementos distintos formadas con líneas no continuas acopladas indirectamente por medio de arcos proporcionan una mejor precisión que los elementos circulares y proporcionan una ventaja de eficiencia computacional por sobre los elementos distintos con líneas rectas solamente. Las líneas rectas y los radios de arco variables proporcionan una relación de aspecto más realista en comparación con los círculos, mientras que los arcos proporcionan una manera más eficiente de detectar contactos entre elementos vecinos en comparación con elementos con líneas rectas solamente.

Cada elemento distinto avanzado 100 en un modelo de simulación de voladuras puede almacenarse en la memoria de un sistema de modelado. Por

ejemplo, el elemento distinto avanzado 100 puede ser una estructura de datos que comprende coordenadas de nodo de punto final de línea, puntos finales de arco designados, puntos centrales de arco, radios de arco, y ángulos de arco.

En algunas modalidades, la primera etapa en el algoritmo de detección de contactos es un proceso de discretización (*binning*) que clasifica los elementos de GEM en regiones geométricas cuadradas o contenedores que están fijos en el espacio. La detección detallada de contactos ocurre para los elementos mediante la búsqueda de cada contenedor y sus vecinos para contactos de arco a arco y de arco a línea. Este método de clasificación de contenedores es altamente eficiente en la búsqueda de contactos entre elementos porque cada contenedor contiene solo unos pocos elementos en cada momento.

La detección de contactos y resolución de elementos de GEM con sus vecinos se ilustra en la Figura 2 para un par dado de arcos así como también de arco a línea. Este algoritmo de detección de contactos tiene la eficiencia computacional de los elementos circulares.

La detección y resolución de contactos entre los lados de dos elementos de GEM no es necesaria porque será detectada por contactos anteriores de arco a línea como se ilustra en la Figura 2. Esto hace que el algoritmo de detección de contactos de GEM sea incluso más eficiente.

Las Figuras 2-4 ilustran diversas maneras de detectar contactos entre elementos distintos avanzados. Dos mecanismos clave de interacción entre elementos para detectar contactos entre elementos vecinos son arco a arco como se ilustra en la Figura 2, y arco a línea como se ilustra en la Figura 3. Otro mecanismo de interacción posible es línea a línea como se ilustra en la Figura 4. Sin embargo, como se describe en mayor detalle más abajo, el contacto línea a línea puede ser detectado por los mecanismos de interacción de arco a línea.

La detección de estas interacciones de elementos entre los elementos distintos avanzados es muy eficiente computacionalmente, mucho más que las

interacciones entre elementos distintos de lados rectos. Los elementos distintos avanzados también tienen una relación de aspecto mayor que uno con más abultamiento natural y fricción entre partículas que los elementos circulares.

Los elementos distintos avanzados descritos permitirán una simulación para aumentar la fidelidad en el modelado de elementos distintos de voladura de rocas porque los elementos tienen una relación de aspecto que los elementos circulares no tienen y exhibirán naturalmente más del comportamiento natural de las rocas durante el movimiento inducido por la voladura tal como el abultamiento, y fricción entre elementos.

También, debido a la simplicidad computacional y la velocidad de detección y resolución de contactos arco a arco y arco a línea, pueden completarse simulaciones de mayor fidelidad con un tiempo de cálculo sustancialmente menor. Esto implica que pueden lograrse simulaciones de voladuras significativamente más realistas en computadoras portátiles menos costosas y más portátiles.

La Figura 2 ilustra una técnica de detección de contacto de arco a arco que puede ser usada por un sistema de modelado para determinar el contacto entre arcos de elementos vecinos. Como se muestra, un primer elemento 202 con un primer arco 216 es vecino de un segundo elemento 204 con un segundo arco 218.

Para detectar si los arcos de estos dos elementos entran en contacto entre sí durante una etapa de tiempo de una simulación, un sistema de modelado puede determinar si existe una superposición entre el primer arco 216 y el segundo arco 218. Tal superposición de arcos puede denominarse contacto de arco a arco. La detección del contacto arco a arco entre los elementos vecinos comprende comparar una distancia 214 entre puntos centrales de arcos (es decir, primer punto central 206 y segundo punto central 208) del primer arco 216 y el segundo arco 218 de los elementos vecinos con una suma de un primer radio 210 y un segundo radio 212 de los dos arcos de los elementos vecinos. Por ejemplo, en algunas modalidades, el contacto arco a arco se detecta cuando la suma de los radios es mayor que la distancia 214.

La Figura 3 ilustra una técnica de detección de contacto de arco a línea que puede ser usada por un sistema de modelado para determinar el contacto entre un arco 310 y una línea 312 de elementos vecinos. En esta figura, el primer elemento 302 y el segundo elemento 304 son elementos vecinos donde los puntos más cercanos a lo largo de los perímetros de los elementos son el arco 310 del segundo elemento 304 y la línea 312 del primer elemento 302. R1 representa el radio 308 del arco 310 y D representa una distancia más corta 306 entre un punto central de arco 314 y la línea 312. Un sistema de modelado puede determinar la distancia 306 usando el producto punto.

10 Cuando el arco 310 y una línea 312 se superponen en la simulación, esto se denomina contacto de arco a línea. Un sistema de modelado puede detectar el contacto de arco a línea entre los elementos vecinos comparando un radio 308 del arco 310 con una distancia 306 entre la línea 312 de un primer elemento 302 y un punto central de arco 314 del arco 310 del segundo elemento 304. Por ejemplo, el contacto puede detectarse
15 cuando el radio 308 es mayor que la distancia 306.

La Figura 4 ilustra cómo un contacto línea a línea puede ser detectado por un sistema de modelado usando la técnica de contacto de arco a línea descrita con referencia a la Figura 3. El contacto línea a línea ocurre cuando una primera línea 402 de un primer elemento 406 se superpone con una segunda línea 404 de un segundo elemento 408. La detección directa del contacto línea a línea es computacionalmente menos eficiente que la detección de contacto de arco a arco y la detección de contacto de arco a línea. Por lo tanto, en algunas modalidades, el contacto línea a línea puede detectarse indirectamente usando la técnica de detección de contacto de arco a línea porque cuando las líneas se superponen, uno del primer arco 410 y el segundo arco 412
20 o ambos se superpondrán con la primera línea 402.
25

Por lo tanto, para determinar el contacto del elemento vecino, un sistema de modelado puede usar la técnica de contacto de arco a línea descrita con referencia a la Figura 3 en uno del primer arco 410 y el segundo arco 412 o ambos.

Por ejemplo, el sistema puede comparar un radio del primer arco 410 con una distancia entre la primera línea 402 y un punto central del primer arco 410 y comparar un radio del segundo arco 412 con una distancia entre la primera línea 402 y un punto central del segundo arco 412.

5 La Figura 5 ilustra un cálculo de fuerza que un sistema de modelado puede usar para determinar una fuerza aplicada a un elemento distinto avanzado por los elementos en contacto. El sistema de modelado puede calcular la magnitud y dirección de las fuerzas aplicadas a cada elemento. El sistema detecta el contacto entre el primer elemento 502 y el segundo elemento 504 cuando existe una
10 superposición 506 de los perímetros de los dos elementos distintos durante una etapa de tiempo de una simulación. El sistema de modelado resuelve o elimina la superposición aplicando fuerzas de restauración que se calculan para eliminar la superposición 506. Estas fuerzas de restauración se aplican tanto al primer elemento 502 como al segundo elemento 504.

15 Como parte de una simulación, un sistema de modelado puede determinar el contacto y calcular una fuerza a aplicar a cada elemento mediante un elemento vecino de contacto. La fuerza se calcula basada en la superposición 506 causada por el contacto. Para el contacto arco a arco, la fuerza se aplica a través de los puntos centrales del arco (es decir, el primer punto central de arco 508 y segundo punto central de arco 510) para
20 el contacto arco a arco. Para el contacto de arco a línea, la fuerza se aplica perpendicular a la línea y a través de un centro del arco. La magnitud de esta fuerza restauradora (F) es igual a la constante de resorte (K) especificada del material multiplicada por la superposición 506 (Δ). Como se ilustra en la Figura 5, $F=K\Delta$.

 La Figura 6 ilustra un cálculo de momento que un sistema de modelado
25 puede usar para determinar un momento 604 aplicado al elemento distinto avanzado 600 por los elementos en contacto. Cada fuerza 606 aplicada al elemento distinto avanzado 600 también producirá un momento 604, M , en el elemento distinto avanzado 600 como se ilustra. Los momentos son aplicados al centro 602 del elemento por todas las fuerzas

5 aplicadas al elemento distinto avanzado 600 incluida la fuerza 606 aplicada al punto central de arco 608 causada por elementos en contacto. En algunas modalidades, el sistema de modelado calcula un momento para cada fuerza por separado y después suma los momentos para determinar un momento total para el elemento distinto avanzado 600.

Un sistema de modelado puede calcular el momento 604 calculando:

$$M=F \times r$$

Ecuación 1

10

Donde:

F es la fuerza 606; y

r 610 es la distancia más corta entre un vector que representa la fuerza 606 y el centro 602 del elemento.

15

El momento total (es decir, la suma de los momentos) se calcula para determinar la rotación del elemento distinto avanzado 600.

20

Las formas de elementos de GEM utilizadas hasta ahora son cuadriláteros, hexaedros, y círculos. Las formas de los elementos pueden controlarse a través de las longitudes de los lados y el radio de los arcos como se ilustra en la Figura 7 para cuadriláteros. Los elementos de GEM pueden tener una relación de aspecto mayor que uno con más abultamiento natural y fricción entre partículas. La detección de contacto del elemento de GEM, las fuerzas de restauración, y la carga de explosivos pueden modelarse utilizando la ecuación de estado Noble-Abel.

25

Partición de energía entre la brisancia, la fragmentación y el desplazamiento

Para los propósitos de modelar el trabajo realizado para mover el burden, puede calcularse el adiabático del explosivo y el trabajo de desplazamiento disponible. Para modelar mecanicistamente la capacidad de los explosivos para desplazar la roca,

puede usarse lo siguiente. Un modelo mecanicista, que por necesidad contiene varios supuestos simplificadores, por ejemplo con respecto a la distribución de tamaños y formas de los fragmentos para ser movidos por los gases producto. Las propiedades de la roca, que a veces se conocen aproximadamente pero frecuentemente necesitan inferirse para el tipo de roca genérico. Por lo tanto, la roca para ser volada frecuentemente se describe como dura, media o blanda, y homogénea, fracturada, o muy fracturada. Una descripción realista de la voladura incluye variaciones en la ubicación y profundidad del agujero y variaciones en la cantidad y calidad de los explosivos. La EOS para el explosivo que describe las presiones del estado de detonación y explosión, la velocidad de detonación, y la disminución de la presión del gas a medida que los gases se expanden (el adiabático). En vista de los factores anteriores, pueden ser adecuadas descripciones aproximadas del explosivo.

Para el modelado del desplazamiento, el adiabático puede tener los siguientes atributos. El adiabático puede cubrir toda la expansión desde el estado de explosión hasta la presión atmosférica. El adiabático puede estar basado en datos disponibles para explosivos comerciales. El adiabático puede reducirse a la ecuación del gas ideal a presiones más bajas. El adiabático puede tener el trabajo disponible total calculado para igualar el calor de reacción (al menos para los explosivos no aluminizados).

Algunas modalidades pueden usar las siguientes ecuaciones para modelar las propiedades de detonación. Estas ecuaciones analíticas calibradas para la presión y velocidad de detonación pueden estar basadas en la densidad, el calor calculado de reacción, y una versión simple de la mezcla de gas producto para el explosivo.

$$P_{cj}=15,58\phi\rho_0^2$$

Ecuación 2

Donde:

P_{cj} es la presión cj en kilobares;

ρ_o es la densidad inicial o cargada del explosivo en gramos por centímetro cúbico;

cj designa el estado de Chapman-Jouget, que es el estado de presión y de volumen de los gases del explosivo inmediatamente después de la detonación; y

$$\varphi = NM^{1/2}Q^{1/2}$$

Donde:

N es el número de moles de productos de detonación gaseosos por gramo;

M es el peso molecular promedio del gas en gramos; y

Q es la energía química de la reacción de detonación ($-\Delta H^\circ$) en cal/g.

Para Q , puede usarse el cambio en el calor de formación ($-\Delta H_f^\circ$). Para los explosivos con balance de oxígeno, $M = 1/N$, pero las ecuaciones para N y M anteriores tienen el resultado de que $M \neq 1/N$ para explosivos de oxígeno negativo.

En algunas modalidades, la EOS tiene la siguiente forma.

$$P(V-b)=nRT$$

Ecuación 3

Donde:

P es la presión hidrostática en Pa;

V es el volumen específico de los productos gaseosos en m³/kg;

b es el covolumen, una constante, en m³/kg;

n es el número de moles de producto gaseoso en moles/kg;

R es la constante universal de gas = 8,314 J/mol/K; y

T es la temperatura del gas en K.

Esta EOS tiene la propiedad deseable a lo largo de todo el adiabático.

$$P(V-b)^\gamma = \text{constante} = k$$

5

Ecuación 4

Donde:

γ es la relación de calores específicos = C_p/C_v , comportándose idealmente; y

10

k es una constante evaluada para valores conocidos de P , V , b y γ .

Para un proceso adiabático, el trabajo realizado por los gases producto puede ser igual al cambio en la energía interna Q :

$$W = \int P dv = \int C_v dT = Q$$

15

Ecuación 5

A partir de estas 2 ecuaciones puede demostrarse que:

$$b = \frac{P_e V_e - P_f V_f - Q(\gamma - 1)}{P_e - P_f}$$

20

Ecuación 6

$$V_f = \left(\frac{P_e}{P_f} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (V_e - b) + b$$

Ecuación 7

25

Donde los subíndices e y f se refieren al estado de explosión (cuando los gases producto tienen la misma densidad que el explosivo sin reaccionar), y el

estado final a la atmósfera. Estas ecuaciones simultáneas en b y V_f pueden ser resueltas por iteración.

Para simulaciones más precisas, puede aplicarse la partición de energía del explosivo entre la brisancia y el desplazamiento. La energía de brisancia es aquella
5 que expande el barreno y propaga ondas de choque/esfuerzo en la roca produciendo la mayor parte de la fragmentación. La energía de desplazamiento es aquella que permanece en los productos gaseosos del explosivo en la forma de presión y calor. Esta energía gaseosa restante mueve la roca dando lugar a un desplazamiento o lanzamiento.

La energía del explosivo puede dividirse en trabajo total disponible y
10 energía de brisancia, como se describe más abajo. La mitad de las energías de choque y deformación elástica puede dirigirse a través del burden hacia la cara libre, mientras que la otra mitad desaparece en la roca detrás de la explosión. También, parte de la energía perdida al comprimir la roca triturada puede ser devuelta al gas a medida que cae la presión. Por estas razones, puede adoptarse la siguiente aproximación para el trabajo de
15 desplazamiento:

$$W_{\text{desplazamiento}} = W_{\text{total}} - \frac{1}{2}W_{\text{brisancia}}$$

Ecuación 8

20 Como se muestra en la Ecuación 8, el trabajo de desplazamiento puede ser el trabajo total disponible menos una porción de la energía de brisancia. En algunas modalidades, la cantidad de trabajo de brisancia que se resta del trabajo total disponible para determinar el trabajo de desplazamiento puede ser la mitad como se describió en la Ecuación 8 anterior. En otras modalidades, la fracción del trabajo de
25 brisancia que se resta del trabajo total disponible para determinar el trabajo de desplazamiento puede ser diferente. Por ejemplo, en algunas modalidades, el parámetro que reduce el trabajo de brisancia puede estar en el rango de 0,1 a 0,9. En algunas modalidades, el parámetro puede ser ajustable basado en factores

ambientales. Por ejemplo, para diferentes valores de dureza de roca, una fracción diferente de la energía de brisancia puede eliminarse del trabajo total disponible para calcular el trabajo de desplazamiento.

5 Como se muestra en la Ecuación 8, en algunas modalidades la energía de desplazamiento del explosivo puede dividirse en trabajo total disponible, W , y la mitad de la energía de brisancia. Esta reducción en la energía de desplazamiento puede ser representativa de un escenario en el que la mitad de la energía se irradia hacia la cara libre donde puede ocurrir el movimiento. Algunos explosivos de interés han sido caracterizados en la EOS descrita anteriormente. La
10 presión inicial del pozo para la simulación de desplazamiento puede calcularse utilizando el adiabático basado en la EOS. Puede ser único para cada combinación de explosivo/roca.

La brisancia puede comprender la etapa durante la cual la roca que rodea el agujero puede ser triturada, y una onda de choque se libera en la roca,
15 dejando esa roca en un estado de deformación elástica. Brisancia se refiere al grado de trituramiento y choque elástico ejercido por el explosivo. Se irradia uniformemente en todas direcciones desde el barreno.

Dado que la generación y propagación de (mayormente) fracturas radiales es lenta en comparación con la escala de tiempo del choque, este estado
20 de fin de choque se denomina y se trata como cuasiestático. El radio del agujero aumenta desde R_0 a R_{el} (radio “elástico”), el volumen de gas aumenta a $V_{el,g}$ y la presión cae a P_{el} (anterior) a lo largo del adiabático.

Este proceso puede considerarse a continuación en tres etapas. En primer lugar, parte de la roca que rodea el agujero, que falla bajo compresión y
25 cizallamiento, es triturada. En segundo lugar, este anular de roca triturada se comprime aumentando de esta manera el espacio disponible para los gases producto, y en tercer lugar la roca más allá de la zona triturada queda (por el paso de la onda de

choque) en un estado de deformación elástica. Esta deformación aumenta aún más el volumen disponible para los gases producto.

Un método para calcular la zona triturada que rodea un pozo comprende el siguiente cálculo.

5

$$R_{cr}/R_0 = k.(P/\sigma_c)^{0,4}$$

Ecuación 9

Donde:

10

R_{cr} es el radio del agujero + zona triturada;

R_0 es el radio inicial del agujero;

k es una constante, en unidades SI $k \sim 0,55$;

P es la presión en el agujero; y

σ_c es la resistencia a la compresión uniaxial (UCS, por sus siglas en inglés)

15

dinámica de la roca.

Cabe mencionar que para que la roca sea triturada $R_{cr}/R_0 > 1$.

Generalmente, $R_{cr}/R_0 \geq 1$.

En algunas modalidades, el valor de k puede establecerse haciendo que R_{cr} sea solo ligeramente más grande que R_0 para ANFO en roca muy dura, a partir de lo cual se encontró que $k = 0,55$. Como parte integral del proceso de trituración, la roca triturada también es comprimida. El volumen de la roca triturada sin comprimir $V_{cr,u}$ puede conocerse a partir del tamaño del anular $R_{cr} - R_0$ por longitud unitaria de pozo. El cambio en volumen debido a la compresión se aproxima mediante;

25

$$\Delta V_{cr} = V_{cr,u} \cdot (P/K)$$

Ecuación 10

Donde:

P es la presión del pozo en el adiabático del gas del explosivo; y

K es el módulo de volumen de compresibilidad de la roca.

Mientras la roca está siendo triturada y comprimida, se genera una onda de choque que se propaga lejos del agujero. Este proceso dinámico complejo puede aproximarse para el modelado. Puede suponerse que la roca que rodea la zona de trituración se comporta elásticamente. Usando una suposición cuasiestática, esta compresión elástica puede evaluarse usando las ecuaciones ampliamente disponibles para un cilindro de paredes gruesas. La presión interna pertinente es la presión del pozo a lo largo del adiabático. El radio exterior del cilindro de paredes gruesas puede establecerse hasta el infinito. (El uso de un radio externo igual al burden produce una diferencia insignificante en los resultados). El cambio en el volumen interno del cilindro debido a la compresión elástica de la pared muy gruesa del cilindro viene dado entonces por la siguiente ecuación.

15

$$V/V_i = ((a+da)/a)^2 = [(P(1+\nu)/E + 1)]^2$$

Donde:

V es el volumen interno expandido;

20 V_i es el volumen inicial del cilindro (antes de que se aplique la presión interna);

a es el radio del cilindro;

da es el cambio en el radio;

P es la presión en el adiabático;

25 ν es la relación de Poisson; y

E es el módulo de Young de la roca.

Estas expresiones proporcionan la relación funcional entre el volumen del pozo como resultado de la trituración y compresión de la roca alrededor del agujero, y el

estado final de la compresión elástica de la roca después del paso de la onda de choque. La solución simultánea de estas ecuaciones con la ecuación $P(V)$ del adiabático da la presión al final de la brisancia, y a partir de eso, el trabajo realizado entre los estados de CJ y brisancia.

5 Este anular de roca triturada entre R_0 y R_{cr} es comprimido por los gases producto de acuerdo con el módulo dinámico de volumen de la roca y la presión del gas. La etapa final en el algoritmo de brisancia puede ser calcular el estado del pozo después del paso de la onda de choque. La roca que rodea el agujero puede tratarse como elástica y el burden como un cilindro de paredes gruesas, lo que permite calcular el cambio
10 adicional en el radio del agujero.

El trabajo de brisancia puede ser determinado por:

$$W_{\text{brisancia}} = \int P dV \text{ desde el CJ hasta el estado de fin de choque} = \text{estado elástico (el)} \\ = (P_{cj}(V_{cj} - b) - P_{el}(V_{el,g} - b)) / (\gamma - 1)$$

15

Donde:

cj designa el estado de Chapman-Jouget, que es el estado de presión y de volumen de los gases del explosivo inmediatamente después de la detonación;

20

P_{cj} = Presión cj;

V_{cj} = Volumen cj;

b = Covolumen de la ecuación de estado Noble Abel para un explosivo específico;

P_{el} = Presión del estado elástico;

25

$V_{el,g}$ = Volumen del estado elástico; y

γ = Relación de capacidad calorífica C_p/C_v .

Por último, para proporcionar un adiabático de desplazamiento para su uso en GEM, puede calcularse un nuevo estado de desplazamiento inicial (d) de manera que:

5
$$W_{\text{desplazamiento}} = [(P_d(V_d - b) - P_f(V_f - b)) / (\gamma - 1)] = W_{\text{total}} - \frac{1}{2}W_{\text{brisancia}}$$

Donde:

P_d = presión inicial del estado de desplazamiento;

V_d = volumen inicial del estado de desplazamiento; y

10 P_f y V_f son la presión y volumen final del estado de desplazamiento

Los algoritmos de simulaciones para el movimiento de rocas pueden usar estados inicial y final del proceso de desplazamiento y el adiabático $P(V)$ que vincula estos 2 estados. Para usar $W_{\text{desplazamiento}} = W_{\text{total}} - \frac{1}{2}W_{\text{brisancia}}$, puede crearse un nuevo estado artificial a lo largo del proceso adiabático de tal manera que la
15 energía entre este estado y el estado CJ (o, igualmente, entre este estado y el estado de brisancia) sea igual a $\frac{1}{2}W_{\text{brisancia}}$. Este estado puede denominarse estado de desplazamiento inicial, caracterizado por P_{id} . Los valores ilustrativos de P_{id} para diferentes combinaciones de explosivos/roca se muestran en la Figura 19.

Para el modelado de fragmentación y desplazamiento, el adiabático
20 puede estar basado en datos que estén disponibles para explosivos comerciales, usando la EOS de Noble-Abel. Las modalidades pueden producir predicciones de comportamiento de proyección consistentes con la formulación del explosivo.

La implementación de la carga de elementos de gas del explosivo puede incluir lo siguiente. Las cargas de productos de gas de explosivos pueden
25 calcularse considerando la expansión del agujero de explosión y la difusión del gas dentro de la roca fracturada. La presión en el gas puede ser calculada usando el adiabático. La permeabilidad inducida por fractura de la roca puede aumentar a medida que el barrenado se expande.

La Figura 8 es un gráfico de un adiabático ilustrativo 800 para una explosión. El adiabático 800 muestra un estado de presión y de volumen de la explosión. La presión en el gas puede calcularse usando la EOS descrita anteriormente basada en un volumen específico actual. El trabajo total disponible 812 para la explosión puede incluir el área bajo el adiabático 800 desde el punto de detonación 802 (p. ej., P_{cj} , V_{cj}) hasta que la detonación alcance la presión atmosférica (p. ej., punto final 814).

Un punto de brisancia 804 ($P_{Brisancia}$, $V_{Brisancia}$) puede definir un final del estado de brisancia. El área bajo el adiabático 800 entre el punto de detonación 802 y el punto de brisancia 804 es el trabajo de brisancia de la explosión. No todo el trabajo realizado durante el estado de brisancia (p. ej., antes del punto de brisancia 804) contribuirá al desplazamiento de las rocas. La energía de brisancia expande el barreno y propaga ondas de choque/esfuerzo en la roca produciendo la mayor parte de la fragmentación. Parte de esta energía de brisancia contribuirá al desplazamiento de las rocas.

Como se muestra, el trabajo de brisancia se divide en una primera sección 808 y una segunda sección 810. En algunas modalidades, el trabajo realizado en la primera sección 808 puede ser la mitad del trabajo de brisancia, y el trabajo realizado durante la segunda sección 810 también puede ser la mitad del trabajo de brisancia. Para determinar $W_{desplazamiento} = W_{total} - \frac{1}{2}W_{brisancia}$, se indica un estado de desplazamiento inicial 806 (es decir, P_{id}) a lo largo del adiabático 800. En algunas modalidades, el estado de desplazamiento inicial 806 puede posicionarse de tal manera que la energía entre el estado de desplazamiento inicial 806 y el punto de detonación 802 (o, igualmente, entre este estado y el punto de brisancia 804) sea igual a $\frac{1}{2}W_{brisancia}$. El $W_{brisancia}$ es igual al trabajo entre el punto de detonación 802 y el punto de brisancia 804 (p. ej., la primera sección 808 y la segunda sección 810). En otras modalidades, la primera sección 808 y la segunda sección 810 pueden ser diferentes. Por ejemplo, el estado de desplazamiento inicial 806 puede posicionarse de tal manera

que la energía entre el estado de desplazamiento inicial 806 y el punto de detonación 802 esté en algún punto en el rango entre $.1 * W_{\text{brisancia}}$ a $.9 * W_{\text{brisancia}}$ (es decir, 10 % a 90 % de $W_{\text{brisancia}}$). En otro ejemplo, el estado de desplazamiento inicial 806 puede posicionarse de tal manera que la energía entre el estado de desplazamiento inicial 806 y el punto de detonación 802 esté en algún punto en el rango entre $.4 * W_{\text{brisancia}}$ a $.6 * W_{\text{brisancia}}$ (es decir, 40 % a 60 % de $W_{\text{brisancia}}$).

La primera sección 808 puede considerarse la energía usada para ondas de choque/esfuerzo en la roca que produce la mayor parte de la fragmentación antes de que comience el desplazamiento de las rocas. Una vez que se alcanza el estado de desplazamiento inicial 806, la presión entre el estado de desplazamiento inicial 806 y el punto final 814 puede usarse para calcular el desplazamiento de las rocas en una simulación. La energía de desplazamiento (p. ej., trabajo total disponible 812 menos la primera sección 808) es la que permanece en los productos de gas del explosivo en la forma de presión y calor. Esta energía gaseosa restante mueve la roca dando lugar a un desplazamiento o lanzamiento. Por consiguiente, los sistemas pueden usar el trabajo entre el estado de desplazamiento inicial 806 y el punto final 814 para simular el desplazamiento.

Mediante el uso de una porción de la energía de brisancia en los cálculos de desplazamiento, una simulación puede producir resultados más precisos. En consecuencia, $W_{\text{desplazamiento}} = W_{\text{total}} - Y * W_{\text{brisancia}}$, donde Y es una variable que es menor que uno. En algunas modalidades, la mitad del trabajo de brisancia puede ser eliminado del trabajo total disponible para determinar el trabajo de desplazamiento. En algunas modalidades, la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 40 % a 60 % del trabajo de brisancia. En algunas modalidades, la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 10 % a 90 % del trabajo de brisancia.

Usar menos del trabajo total de brisancia puede surgir de dos consideraciones. En primer lugar, la energía de choque dinámica puede impartir un

momento hacia adelante a la roca del burden, que (en 2-D) es la mitad de la roca afectada por la onda de choque, y en segundo lugar, puede recuperarse parte del trabajo realizado en la compresión elástica de la roca fuera del anular triturado a medida que esta roca se relaja cuando cae la presión. El modelado de desplazamiento descrito en las Figuras 10-23 ilustra las consecuencias de usar el trabajo total menos una porción del trabajo de brisancia al determinar el trabajo de desplazamiento.

La Figura 9 ilustra un diagrama de flujo para un método de elementos discretos 900 de acuerdo con algunas modalidades. El método 900 puede inicializar 902 un modelo de elementos discretos. Inicializar un modelo puede incluir generar, crear, o iniciar un modelo para una simulación. La inicialización puede incluir generar detalles con respecto al modelo, determinar un punto de inicio para la simulación, determinar formas/tamaños de elementos, etc. Al inicializar el modelo, el método 900 puede calcular masas y constantes de resorte, calcular una etapa de tiempo estable, definir la carga explosiva, y calcular las coordenadas del elemento.

El método 900 puede 904 integrar movimientos de elementos a través de cada etapa de tiempo. Para cada etapa de tiempo, el método 900 puede determinar nuevas coordenadas de elementos, detectar nuevos contactos de elementos, calcular fuerzas de eliminación de contactos, y definir cualquier nueva fuerza de carga explosiva. El movimiento de los elementos puede comenzar después de que se alcanza el estado de desplazamiento inicial. La energía de desplazamiento (p. ej., $W_{\text{desplazamiento}} = W_{\text{total}} - Y * W_{\text{brisancia}}$) puede usarse como una fuerza que mueve los elementos. El método 900 realiza un ciclo a través de las etapas de tiempo hasta que se alcanza un tiempo de terminación.

En algunas modalidades, la partición de energía puede usarse en un método para cargar un barreno. Por ejemplo, un método puede incluir determinar un perfil de carga de explosivos para un barreno para lograr un resultado deseado, y cargar el barreno con explosivos de acuerdo con el perfil de carga. Determinar un perfil de carga

de explosivos puede incluir simular una voladura determinando un trabajo total disponible a partir de una detonación hipotética de un explosivo y dividir el trabajo total disponible eliminando una porción del trabajo de brisancia del trabajo total disponible para generar trabajo de desplazamiento, de tal manera que simular una voladura esté basado en el trabajo de desplazamiento, y seleccionar el explosivo para lograr la voladura simulada que se aproxime al resultado deseado.

En algunas modalidades, el trabajo de brisancia es un trabajo realizado entre la detonación hipotética y un punto de brisancia del explosivo. En algunas modalidades, seleccionar el explosivo comprende identificar un tipo de explosivo y/o una salida de energía de un explosivo. En algunas modalidades, el tipo de explosivo se selecciona de al menos uno de: un explosivo en emulsión, perlas de nitrato de amonio y fueloil, un explosivo basado en hidrogel, o combinaciones y mezclas de estos. En algunas modalidades, la salida de energía de un explosivo se selecciona de al menos uno de: una densidad de un explosivo, o un volumen de un explosivo. En algunas modalidades, seleccionar el explosivo comprende seleccionar múltiples salidas de energía de un explosivo en diferentes porciones del barreno. En algunas modalidades, la selección del explosivo comprende seleccionar múltiples tipos de explosivos en diferentes porciones del barreno.

Las Figuras 10-12 ilustran los resultados de una primera simulación de voladura usando GEM y partición de energía. La Figura 10 ilustra cuatro instantáneas de tiempo de una simulación de GEM de una voladura utilizando elementos circulares, así como la técnica de partición de energía explosiva descrita anteriormente. La técnica de partición de energía puede conducir a simulaciones más precisas.

Por ejemplo, la Figura 11 ilustra un cuadro 1100 que compara el banco sondeado 1102 y el perfil 1104 de pila de rezaga con el banco modelado 1106 y el perfil de pila de rezaga predicho 1108. El perfil de pila de rezaga predicho 1108 se generó usando GEM y partición de energía (p. ej., $W_{\text{desplazamiento}} = W_{\text{total}} - \frac{1}{2}W_{\text{brisancia}}$). Se supuso que la línea de proyección, que es el ángulo de reposo de la rezaga, era de 45 grados. El

perfil de rezaga así como el porcentaje de proyección calculado de 45,6 %, en comparación con el medido de 45 %, añade credibilidad a la fiabilidad de la partición de energía y GEM como herramienta predictiva del movimiento por voladuras. Un aspecto importante de estas simulaciones es la inclusión de partición de energía.

5 La velocidad de cara es una métrica importante para entender, predecir, y mejorar la proyección por voladura. Las velocidades de cara se midieron durante esta voladura utilizando cajas pintadas de naranja llenas de roca colgadas de la cara. La Figura 12 ilustra un gráfico 1200 que muestra una comparación entre la velocidad de cara medida 1202 y las velocidades de cara predichas de GEM simuladas con
10 elementos circulares y hexaédricos. Las velocidades medidas de cámara de alta velocidad abarcan las velocidades predichas (p. ej., velocidad simulada circular 1206 y velocidad simulada hexagonal 1204) y tres de las velocidades medidas están cerca de las predichas. No obstante, dos de las velocidades medidas son significativamente más altas que la media y una es significativamente menor. El examen de la cara del
15 banco tanto en el modelado de GEM como en la foto de la voladura conduce a una explicación viable. La figura muestra una inclinación sustancial de la cara al principio de la voladura. La Figura 10, en el tiempo de 0,74 segundos ilustra la inclinación de la cara pero que parece ser menos drástica que la de la explosión. Una posibilidad para las diferencias en el comportamiento de velocidad es que los elementos de GEM en
20 la configuración hexagonal de paquete cerrado resisten el deslizamiento horizontal más que lo que ocurre en el esquisto estratificado que está siendo volado.

Las velocidades de cara predichas por GEM coinciden aproximadamente con la curvatura de la cara según lo medido. Las tres mediciones de velocidad de cara más altas no producirían la curvatura de la cara y se cree que son erróneas. El choque
25 explosivo que impacta la cara libre puede lanzar los objetivos a una velocidad mayor que la cara libre.

La Figura 13 ilustra los resultados 1300 de una segunda voladura modelada con elementos tanto circulares como hexagonales y comparada con una

pila de rezaga sondeada 1302. Los elementos hexagonales que dan como resultado el perfil hexagonal 1306 no se mueven tan fácilmente como los elementos circulares que dan como resultado el perfil circular 1304 que da lugar a una pila de rezaga más alta en la parte posterior de la voladura y más baja en la parte frontal. Otra forma de describir el comportamiento es que el centro de gravedad de la pila de rezaga se ha movido menos para los elementos hexagonales.

Otro ejemplo del impacto correctivo de este nuevo método de partición de energía se ilustra en la Figura 14 y la Figura 15. El desplazamiento de esta voladura estuvo subpredicho anteriormente como 42 % pero la versión actual de GEM con partición de energía es de 44 %. La Figura 14 ilustra un modelo 1400 que usa elementos de GEM de acuerdo con algunas modalidades. La Figura 15 ilustra cuatro sellos de tiempo 1500 de una simulación del modelo de la Figura 14 usando partición de energía de acuerdo con algunas modalidades.

La Figura 16 ilustra un modelo 1600 de mina de carbón de acuerdo con algunas modalidades. El modelo 1600 ilustra un banco 1604 y una serie de barrenos 1602. Dado que GEM predice el movimiento de las rocas, y el desplazamiento es significativo en la voladura de proyección, se usó una voladura de proyección genérica para una simulación. Los resultados de la simulación para diferentes casos se ilustran en las Figuras 17-23. A menos que se indique de cualquier otra manera, la altura de banco del banco 1604 se estableció en 40 m (131 pies), el ángulo de agujero de los barrenos 1602 se estableció en 20°, el diámetro del agujero se estableció en 270 mm (105/8 pulgadas), y el factor de polvo se estableció en 0,693 - 0,695 kg/m³ (0,85 cu yd/lb). El porcentaje de proyección se calculó a partir del volumen de roca más allá de la línea de proyección de 45° 1606.

El trabajo disponible para desplazar la roca depende (por medio de la partición de energía) tanto del explosivo como de la roca. Este enfoque debería dar una mejor comprensión del desplazamiento que el simple uso del factor polvo combinado con Calor de Reacción o Fuerza Relativa por Peso (RWS, por sus siglas

en inglés). Se usaron cuatro explosivos diferentes para simular voladuras del modelo 1600 en la Figura 16. La Figura 17 ilustra una tabla 1700 de los cuatro explosivos diferentes. Los explosivos usados para la simulación incluyen emulsión de ANFO, mezcla 50/50, y una mezcla no ideal.

5 La Figura 18 muestra una tabla 1800 que incluye tipos de roca genéricos usados para la simulación del modelo 1600 de la Figura 16. En la tabla 1800, se muestran dos densidades para cada dureza de roca. La densidad variable es genérica para los tipos de roca; la densidad común se usó en algunas corridas de la simulación para eliminar el efecto de la densidad de roca en el porcentaje de
10 proyección. La variable UCS significa Fuerza compresiva uniaxial. Dado que la voladura tiene tasas de deformación muy altas, y dado que la mayoría de las propiedades de la roca son valores estáticos, se usó un Factor de Aumento Dinámico (DIF, por sus siglas en inglés) para las simulaciones. Tanto el módulo de Young como la UCS en la tabla 1800 se multiplicaron por el DIF antes de su uso en los cálculos de
15 brisancia para las simulaciones.

 Para la mayoría de los casos, se usaron dos tipos de roca extremos de esta tabla en las simulaciones de prueba para el modelo 1600: roca muy blanda y roca muy dura. Los cuatro tipos de explosivos y dos tipos de roca extremos dan lugar a ocho casos principales considerados, como se muestra en la tabla 1900 de
20 la Figura 19.

 La Figura 19 ilustra una tabla 1900 con variables de entrada de ejemplo para los cálculos de simulación para el modelo 1600 en la Figura 16 de acuerdo con algunas modalidades. Se eligieron burdens y separaciones como se muestra en la tabla 1900 para lograr un factor de polvo constante de
25 aproximadamente $0,694 \text{ kg/m}^3$. Se calcularon los valores de P_{id} , $W_{\text{brisancia}}$ y $W_{\text{desplazamiento}}$ como se describió anteriormente. Esta tabla muestra que el trabajo de brisancia (trititación y choque) varía de 6 % a 56 % del trabajo total disponible; el

explosivo realiza un trabajo significativo en roca blanda en la etapa de brisancia, dejando menos energía disponible para el desplazamiento.

Los resultados de las simulaciones para el modelo 1600 con entradas de la tabla 1900 se describen con referencia a las Figuras 20-23. Las simulaciones se realizaron usando GEM y partición de energía. Estos resultados comparan el desplazamiento para los diversos explosivos en dos tipos de roca diferentes. La Figura 20 ilustra una tabla 2000 del desplazamiento calculado para cuatro explosivos en dos tipos de roca. Como se muestra, ANFO tiene la velocidad de cara más alta y el mejor porcentaje de proyección para roca tanto muy blanda como muy dura.

En roca blanda (al mismo factor de polvo), puede haber poca diferencia en el porcentaje de proyección entre la emulsión y un ANFO pesado 50/50 (ver los casos 2, 3 y 4 de la tabla 2000). En la modalidad ilustrada, el porcentaje de proyección para la emulsión es mejor que el del ANFO pesado (al mismo factor de polvo) a pesar de la mejor RWS de la mezcla. Los resultados de proyección en la tabla 2000 se ilustran en la Figura 21. La Figura 21 ilustra un gráfico 2100 que representa los efectos de explosivo y roca en la proyección. Los puntos en el gráfico 2100 son de la tabla 2000 de la Figura 20. La mezcla no ideal da un porcentaje de proyección solo 2 % puntos mejor que el mismo explosivo que se detona idealmente, a pesar de que el trabajo de brisancia ($W_{\text{brisancia}}$) para estos 2 casos es de 1,14 vs 1,85 MJ/kg. (Ver los casos 3 y 4 en la tabla 1900). En otras palabras, cuando un ANFO pesado detona a baja velocidad de detonación y la energía de brisancia se reduce en aproximadamente 40 %, solo hay una ligera mejora en el desplazamiento según lo medido por el porcentaje de proyección.

La tabla 2000 y el gráfico 2100 también muestran que las velocidades de cara y el porcentaje de proyección son mayores en roca muy dura 2104 que en roca muy blanda 2102, para cada uno de los cuatro explosivos. Esto se ilustra adicionalmente en la Figura 22 para los cinco tipos de roca en la tabla 1800 de la Figura 18. La Figura 22 ilustra un gráfico 2200 que muestra el efecto que tiene el tipo de roca en el porcentaje de proyección para ANFO. Como se muestra, la proyección es mayor en rocas duras que en

rocas blandas. Esto puede deberse a que se pierde menos energía en los procesos de
brisancia de trituración y choque.

La Figura 23 ilustra un gráfico 2300 del porcentaje de proyección vs. la
velocidad de cara para dos tipos de roca (es decir, roca muy dura 2304 y roca muy
5 blanda 2302). Los valores para los puntos representados son de la tabla 2000 de la
Figura 20. Como se muestra, la velocidad de cara es generalmente mayor para las
rocas más duras, pero dentro de cada tipo de roca, la velocidad de cara puede no ser
un buen predictor del % de proyección, como se muestra en el gráfico 2300.

10

Ejemplos

Los siguientes ejemplos corresponden a modalidades específicas y
señalan características, elementos o acciones específicos que pueden usarse o
combinarse de cualquier otra manera para lograr tales modalidades.

Ejemplo 1. Un método para simular una voladura por explosivos,
15 comprendiendo el método: inicializar un modelo de un sitio de voladura que
comprende una pluralidad de barrenos; identificar un explosivo para ser usado para
una voladura simulada del modelo; determinar un trabajo total disponible a partir de
una detonación del explosivo; dividir el trabajo total disponible eliminando una
porción del trabajo de brisancia del trabajo total disponible para generar trabajo de
20 desplazamiento, en donde el trabajo de brisancia es un trabajo realizado entre la
detonación y un punto de brisancia del explosivo; y simular la detonación de
explosivo basada en el trabajo de desplazamiento.

Ejemplo 2. El método del ejemplo 1, en donde el trabajo de desplazamiento
se usa para determinar el desplazamiento de elementos del modelo.

25 Ejemplo 3. El método del ejemplo 1 o ejemplo 2, que comprende además
mostrar la voladura simulada y una pila de rezaga resultante que resulta del trabajo de
desplazamiento.

Ejemplo 4. El método de uno cualquiera de los ejemplos 1–3, que comprende además determinar un estado de desplazamiento inicial entre la detonación y el punto de brisancia, en donde el estado de desplazamiento inicial es un punto en el que una presión de la detonación del explosivo comienza a mover
5 elementos del modelo.

Ejemplo 5. El método de uno cualquiera de los ejemplos 1–4, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 10 % a 90 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 6. El método de uno cualquiera de los ejemplos 1–4, en donde
10 la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 40 % a 60 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 7. El método de uno cualquiera de los ejemplos 1–4, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada es la mitad del trabajo de brisancia.

Ejemplo 8. El método de uno cualquiera de los ejemplos 1–7, en donde el
15 modelo comprende una pluralidad de elementos, y en donde simular la detonación comprende determinar el movimiento de los elementos basándose en el trabajo de desplazamiento.

Ejemplo 9. Un aparato informático que comprende: un procesador; y una memoria que almacena instrucciones que, cuando son ejecutadas por el
20 procesador, configuran el aparato para: inicializar un modelo de un sitio de voladura que comprende una pluralidad de barrenos; identificar un explosivo para ser usado para una voladura simulada del modelo; determinar un trabajo total disponible a partir de una detonación del explosivo; dividir el trabajo total disponible eliminando una porción del trabajo de brisancia del trabajo total disponible para generar trabajo de
25 desplazamiento, en donde el trabajo de brisancia es un trabajo realizado entre la detonación y un punto de brisancia del explosivo; y simular la detonación de explosivo basada en el trabajo de desplazamiento.

Ejemplo 10. El aparato informático del ejemplo 9, en donde el trabajo de desplazamiento se usa para determinar el desplazamiento de elementos del modelo.

5 Ejemplo 11. El aparato informático del ejemplo 9 o del ejemplo 10, en donde las instrucciones configuran además el aparato para mostrar la voladura simulada y una pila de rezaga resultante que resulta del trabajo de desplazamiento.

10 Ejemplo 12. El aparato informático de uno cualquiera de los ejemplos 9-11, en donde las instrucciones configuran además el aparato para determinar un estado de desplazamiento inicial entre la detonación y el punto de brisancia, en donde el estado de desplazamiento inicial es un punto en el que una presión de la detonación del explosivo comienza a mover elementos del modelo.

Ejemplo 13. El aparato informático de uno cualquiera de los ejemplos 9-12, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 10 % a 90 % del trabajo de brisancia.

15 Ejemplo 14. El aparato informático de uno cualquiera de los ejemplos 9-12, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 40 % a 60 % del trabajo de brisancia.

20 Ejemplo 15. El aparato informático de uno cualquiera de los ejemplos 9-12, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada es la mitad del trabajo de brisancia.

Ejemplo 16. El aparato informático de uno cualquiera de los ejemplos 9-15, en donde el modelo comprende una pluralidad de elementos, y en donde simular la detonación comprende determinar el movimiento de los elementos basándose en el trabajo de desplazamiento.

25 Ejemplo 17. Un medio de almacenamiento no transitorio legible por computadora, el medio de almacenamiento legible por computadora incluye instrucciones que, cuando son ejecutadas por una computadora, hacen que la computadora: inicialice un modelo de un sitio de voladura que comprende una

pluralidad de barrenos; identifique un explosivo para ser usado para una voladura simulada del modelo; determine un trabajo total disponible a partir de una detonación del explosivo; divida el trabajo total disponible eliminando una porción del trabajo de brisancia del trabajo total disponible para generar trabajo de desplazamiento, en donde
5 el trabajo de brisancia es un trabajo realizado entre la detonación y un punto de brisancia del explosivo; y simule la detonación de explosivo basada en el trabajo de desplazamiento.

Ejemplo 18. El medio de almacenamiento legible por computadora del ejemplo 17, en donde el trabajo de desplazamiento se usa para determinar el
10 desplazamiento de elementos del modelo.

Ejemplo 19. El medio de almacenamiento legible por computadora del ejemplo 17 o ejemplo 18, en donde las instrucciones configuran además la computadora para mostrar la voladura simulada y una pila de rezaga resultante que resulta del trabajo de desplazamiento.

15 Ejemplo 20. El medio de almacenamiento legible por computadora de uno cualquiera de los ejemplos 17-19, en donde las instrucciones configuran además la computadora para determinar un estado de desplazamiento inicial entre la detonación y el punto de brisancia, en donde el estado de desplazamiento inicial es un punto en el que una presión de la detonación del explosivo comienza a mover
20 elementos del modelo.

Ejemplo 21. El medio de almacenamiento legible por computadora de uno cualquiera de los ejemplos 17-20, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 10 % a 90 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 22. El medio de almacenamiento legible por computadora de
25 uno cualquiera de los ejemplos 17-20, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 40 % a 60 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 23. El medio de almacenamiento legible por computadora de uno cualquiera de los ejemplos 17–20, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada es la mitad del trabajo de brisancia.

5 Ejemplo 24. El medio de almacenamiento legible por computadora de uno cualquiera de los ejemplos 17–23, en donde el modelo comprende una pluralidad de elementos, y en donde simular la detonación comprende determinar el movimiento de los elementos basándose en el trabajo de desplazamiento.

10 Ejemplo 25. Un método de carga de un barreno, el método comprende: determinar un perfil de carga de explosivos para un barreno para lograr un resultado deseado; y cargar el barreno con explosivos de acuerdo con el perfil de carga; en donde
15 determinar un perfil de carga de explosivos comprende: simular una voladura determinando un trabajo total disponible a partir de una detonación hipotética de un explosivo y dividir el trabajo total disponible eliminando una porción del trabajo de brisancia del trabajo total disponible para generar trabajo de desplazamiento, de tal manera que
20 simular una voladura esté basado en el trabajo de desplazamiento; y seleccionar el explosivo para lograr la voladura simulada que se aproxima al resultado deseado.

Ejemplo 26. El método del ejemplo 25, en donde el trabajo de brisancia es un trabajo realizado entre la detonación hipotética y un punto de brisancia del explosivo.

20 Ejemplo 27. El método del ejemplo 25 o ejemplo 26, en donde la selección del explosivo comprende identificar un tipo de explosivo y/o una salida de energía de un explosivo.

25 Ejemplo 28. El método de uno cualquiera del ejemplo 27, en donde el tipo de explosivo se selecciona de al menos uno de: un explosivo en emulsión, perlas de nitrato de amonio y fueloil, un explosivo basado en hidrogel, o combinaciones y mezclas de estos.

Ejemplo 29. El método de uno cualquiera del ejemplo 27 o ejemplo 28, en donde la salida de energía de un explosivo se selecciona de al menos uno de: una densidad de un explosivo, o un volumen de un explosivo.

Ejemplo 30. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25-29, en donde la selección del explosivo comprende seleccionar múltiples salidas de energía de un explosivo en diferentes porciones del barreno.

5 Ejemplo 31. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25-30, en donde la selección del explosivo comprende seleccionar múltiples tipos de explosivos en diferentes porciones del barreno.

Ejemplo 32. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25 a 31, en donde el trabajo de desplazamiento se usa para determinar el desplazamiento de elementos de un modelo.

10 Ejemplo 33. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25 a 32, que comprende además mostrar la voladura simulada y una pila de rezaga resultante que resulta del trabajo de desplazamiento.

Ejemplo 34. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25–33, que comprende además determinar un estado de desplazamiento inicial entre la
15 detonación hipotética y un punto de brisancia, en donde el estado de desplazamiento inicial es un punto en el que una presión de la detonación hipotética del explosivo comienza a mover elementos de un modelo.

Ejemplo 35. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25–34, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está
20 entre 10 % a 90 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 36. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25–34, en donde la porción del trabajo de brisancia eliminada del trabajo total disponible está entre 40 % a 60 % del trabajo de brisancia.

Ejemplo 37. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25–34, en
25 donde la porción del trabajo de brisancia eliminada es la mitad del trabajo de brisancia.

Ejemplo 38. El método de uno cualquiera de los ejemplos 25–37, en donde el modelo comprende una pluralidad de elementos, y en donde simular la

detonación hipotética comprende determinar el movimiento de los elementos basándose en el trabajo de desplazamiento.

Las modalidades en la presente descripción proporcionan el modelado de desplazamiento por voladura de roca de elementos distintos de GEM que incluye partición
5 de energía. Las modalidades en la presente descripción pueden predecir con mayor precisión la cantidad de energía del explosivo que contribuye a la fragmentación y al desplazamiento. En algunas modalidades, el trabajo de brisancia puede dividirse en energía de fragmentación y energía de desplazamiento. Obtener la energía correctamente particionada puede eliminar la necesidad de factores de acoplamiento definidos por el
10 usuario que se ajusten para cada modelo de voladura para que coincidan con los resultados del desplazamiento por voladura medidos en el campo.

Los conceptos de partición de energía sugieren que la energía perdida por brisancia puede no estar disponible para desplazamiento. Brisancia puede definirse como el trabajo realizado por el explosivo para triturar la roca que rodea el
15 pozo, y generar la onda de choque (que sale del burden antes de que comience el movimiento del burden). Algunas modalidades en la presente descripción proponen el modelado de la partición de energía, a saber, que una porción (p. ej., la mitad) del trabajo de brisancia calculado contribuya al desplazamiento mientras que la otra mitad no contribuya al movimiento de rocas.

20 Se demuestra que la implementación de los conceptos de partición de energía en GEM no crea una dependencia excesiva de los resultados en el tamaño del elemento, lo que sugiere que la carga de voladura en la roca se realiza de una manera que es insensible al tamaño del elemento.

La referencia en toda la presente memoria descriptiva a una “modalidad”
25 significa que un rasgo, una estructura o una característica particulares descritos en relación con esa modalidad se incluye en al menos una modalidad. Por lo tanto, las referencias a modalidades a lo largo de esta memoria descriptiva no se refieren necesariamente todas a la misma modalidad.

Similarmente, un experto en la técnica apreciará con el beneficio de esta descripción que en la descripción anterior de las modalidades, a veces se agrupan diversas características en una única modalidad, figura o descripción de esta con el fin de agilizar la descripción. Sin embargo, este método de descripción no debe interpretarse

5 como que refleja la intención de que cualquier reivindicación requiere más características que las expresamente mencionadas en esa reivindicación. Más bien, como reflejan las siguientes reivindicaciones, los aspectos inventivos se encuentran en una combinación de menos de todas las características de cualquier modalidad descrita anterior. Por lo tanto, las reivindicaciones que siguen a esta Descripción detallada se incorporan

10 expresamente de esta manera en esta Descripción detallada, con cada reivindicación por sí sola como una modalidad separada. Esta descripción incluye todas las permutaciones de las reivindicaciones independientes con sus reivindicaciones dependientes.

La mención en las reivindicaciones del término “primero” con respecto a una característica o elemento no implica necesariamente la existencia de una segunda

15 característica o elemento adicional. Será evidente para los expertos en la técnica que pueden realizarse cambios en los detalles de las modalidades descritas anteriormente sin apartarse de los principios subyacentes de la presente descripción.

RESUMEN

Un sistema de modelado de voladuras puede generar un modelo del sitio
5 basado en datos de entrada de la voladura. Los datos de entrada de la voladura pueden
incluir datos del barreno, información del banco, y datos geológicos de entrada. El
modelo del sitio puede comprender una pluralidad de elementos distintos que
representan macizos rocosos. El sistema de modelado de voladuras puede simular una
voladura mediante la determinación de las presiones iniciales en cada barreno causadas
10 por una detonación de un explosivo. El sistema de modelado de voladuras puede
determinar un desplazamiento de la voladura basándose en parte en las presiones
iniciales, y mostrar una simulación que está basada en parte en el desplazamiento.