

MODELIZACIÓN DE PARÁMETROS DE VOLADURA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MINERO: LA VOLADURA COMPUTERIZADA.

Jorge Castilla Gómez⁽¹⁾, Juan Herrera Herbert⁽¹⁾

(1) Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. E.T.S. de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Alenza 4, 28003. Madrid (España)

E-mails: jorge.castilla@upm.es, juan.herrera@upm.es

RESUMEN

El proceso de extracción minera por perforación y voladura es el primer paso para la obtención de la mayor parte de los áridos y para la fabricación de los materiales de construcción. Por tanto, es de vital importancia la obtención de una materia prima de calidad al coste más competitivo posible. En este trabajo se establece una metodología para la optimización de voladuras a cielo abierto, empleando herramientas para obtener los datos más precisos y poder conocer cualitativa y cuantitativamente los parámetros reales de voladura. Así, se establecen tres fases de trabajo: Herramientas para el diseño de voladura; herramientas para la monitorización y herramientas para el análisis de resultados. Con la conjunción de estas tres fases y la correcta interpretación de los resultados, se puede obtener un resultado óptimo en el proceso minero, puesto que será posible mejorar la fase de perforación optimizando el número de barrenos y la fase de voladura, asegurando un adecuado comportamiento del explosivo en términos de energía y secuenciación. Los medios empleados se basan en la adquisición de datos mediante técnicas láser, monitorización digital de la voladura y medios de simulación y predicción de resultados mediante análisis informáticos de los datos obtenidos. Además, se consigue controlar las afecciones medioambientales de las voladuras, tales como vibraciones, proyecciones y onda aérea. La metodología descrita es un sistema cíclico de modo que los resultados obtenidos en la fase de análisis, servirán como datos de partida de voladuras posteriores. Así se logra el concepto de voladura computerizada.

ABSTRACT

Drilling and blasting mining process is the first stage of aggregates extraction for construction materials manufacturing. So, obtaining a high quality, cheap and competitive products are so important. In this paper an open pit blasting optimization methodology is described, using several tools to get the most accurate data to know and quantify the actual blasting parameters. Thus, three phases are established: blast design tools, monitoring tools and analysis tools. Merging those three phases, and through a right results interpretation, an optimum mining process results can be obtained. Thereby, a right borehole drilling pattern could be designed to ensure a correct blasting performance, both in energy distribution and timing. Tools used are based on using laser techniques, digital blast monitoring and simulation and prediction software. Thus, environmental effects can be managed properly, such as vibrations, flyrock and airblast. Methodology described consists on a cyclic method, and data obtained in each stage can be used as a next stage feedback. Using that methodology, computerized blast can be achieved.

Palabras clave: Minería, voladura, simulación, monitorización, optimización, análisis.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los trabajos de extracción de roca son muchos los parámetros que influyen en el proceso. De este modo es necesario tener en cuenta aquellos factores que son determinantes en las características de cada explotación.

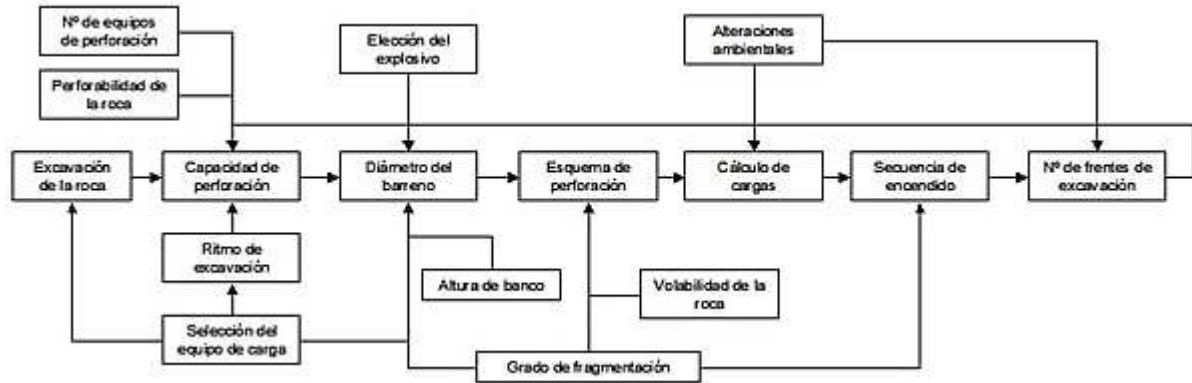


Figura 1: Planificación de una explotación de áridos

En este trabajo se pretende plantear una metodología para poder analizar diferentes aspectos de voladuras en canteras de áridos, con el fin de lograr una optimización de los medios disponibles en cada una de las fases de la explotación. De este modo se describen herramientas útiles para poder valorar cualitativa y cuantitativamente las diferentes fases de la voladura. Estas herramientas se van a clasificar en diferentes clases, en función del tipo de análisis a realizar. De este modo, el estudio se va a dividir en diferentes fases:

Estudio previo a la voladura

Monitorización durante la voladura.

Análisis posterior a la voladura.



Figura 2: Fases para el análisis

El análisis previo a la voladura comprende el estudio del banco de la cantera a volar; la definición de la malla de perforación, así como el estudio energético de la voladura. En este

análisis también estaría incluido el empleo de modelos teóricos del terreno para la predicción de afecciones medioambientales.

El análisis durante la voladura se centra en la monitorización de la misma para poder hacer análisis posteriores, por medio de empleo de grabación de video de alta velocidad, registro de ondas sísmicas y onda aérea generadas, y comportamiento del explosivo en el barreno.

El análisis posterior a la voladura comprende el estudio de los datos adquiridos durante la misma, así como el análisis digital del material volado

Las voladuras en canteras de áridos, y en todas las voladuras en general, se ejecutan en un determinado macizo rocoso. Debido a la naturaleza del mismo este macizo hay que considerarlo como un medio heterogéneo del cual vamos a conocer sus propiedades con cierta incertidumbre. De este modo, es preciso analizar este medio para minimizar este grado de incertidumbre.

Las propiedades del macizo rocoso son variables y por tanto el diseño de las voladuras debe adaptarse en función de estos cambios. Por este motivo, es necesario fijar ciertas propiedades y considerarlas conocidas para poder modelizar el macizo rocoso, con el fin de establecer un diseño inicial con la mayor exactitud posible.

De este modo se puede recurrir a leyes y modelos teóricos, que nos permitan predecir los resultados de las voladuras. Así pues dentro de las propiedades del macizo rocoso se deben conocer:

Tipo de roca

Densidad

Resistencia a compresión

Índice de volabilidad.

Datos geométricos del banco

Fragmentación deseada en función del destino del material y equipos disponibles.

Este factor es importante ya que, por ejemplo, no es lo mismo diseñar voladuras para emplear el material resultante como árido para hormigones que diseñar una voladura para la obtención de escollera.

HERRAMIENTAS A EMPLEAR PREVIAS A LA VOLADURA

Perfilometría 2D

Este sistema consiste en una modelización digital del terreno con el fin de conocer en cada punto los parámetros geométricos del banco a volar. Es posible determinar la altura de banco real, el repié existente así como la presencia de cavernas u oquedades en el terreno que nos puedan ser potenciales puntos de sobrecarga de barrenos.

La perfilometría 2D se realiza por medio de un dispositivo láser que realiza perfiles individuales del frente de voladura, de modo que sea posible realizar el análisis de la piedra presente en cada uno de los barrenos de la primera fila de la voladura, para poder ajustar la carga de cada uno de estos barrenos a la piedra real existente en cada punto. El análisis de

los datos es inmediato por la posibilidad de ver el resultado sobre un dispositivo portátil tipo PDA.

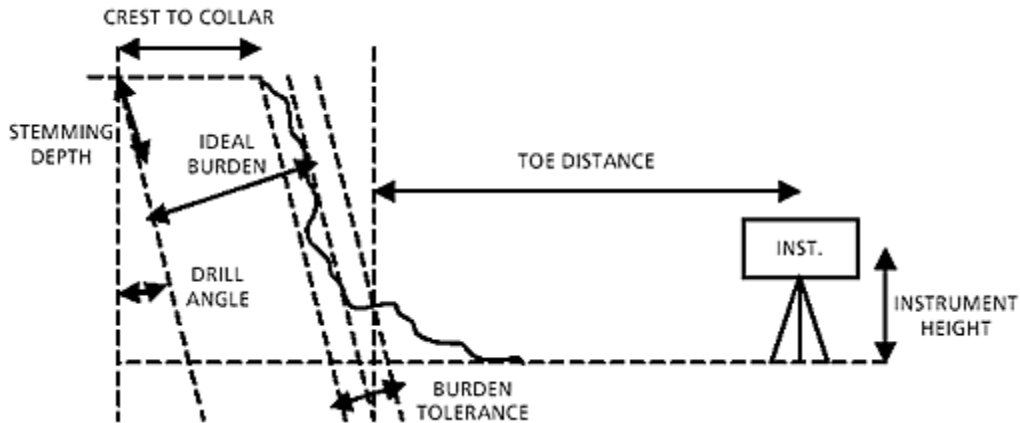


Figura 3: Parámetros obtenidos de la Perfilometría 2D

Las mediciones obtenidas pueden compararse con los parámetros teóricos diseñados para cada voladura.

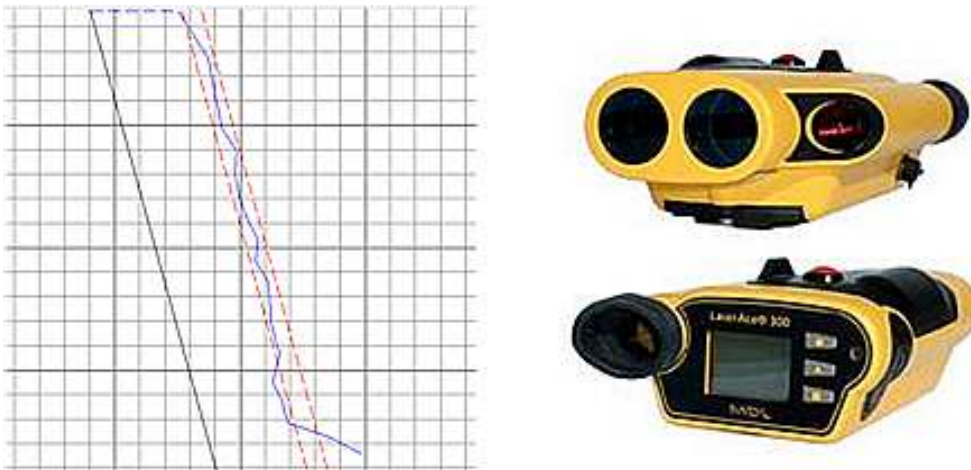


Figura 4: Ejemplo de resultados obtenidos con perfilometría 2D

Perfilometría 3D

La perfilometría en tres dimensiones se realiza, al igual que la 2D, pero con la posibilidad de obtener un perfil digital del frente de la voladura. De este modo es posible analizar de manera conjunta todos los barrenos y la piedra asociada a cada uno.

El análisis en tres dimensiones es mucho más potente que el análisis en 2D ya que es posible realizar un estudio global del banco objeto de estudio y ofrece la posibilidad de completar los datos obtenidos con datos obtenidos de otras aplicaciones, como por ejemplo datos de desviación de barrenos.

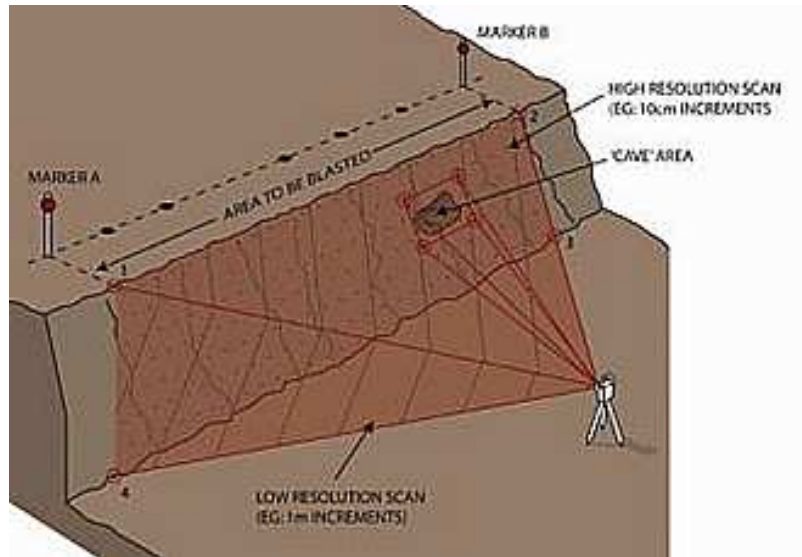


Figura 5: Perfilometría 3D

Determinación de la dirección real de los barrenos

Una herramienta de vital importancia para poder optimizar los resultados de una voladura es la determinación del estado de la perforación de los barrenos. Este parámetro se puede evaluar determinando la dirección real de los barrenos de una voladura. Es común que muchos de los pobres resultados de una voladura, así como problemas de proyecciones y repiés, sean debidos a una perforación deficiente. Esta perforación deficiente puede estar debida por diferentes motivos:

Error de emboquille.

Error de inclinación.

Desviación a lo largo del barreno.

De estos errores, el más difícil de determinar es la desviación producida a lo largo del barreno. Esta desviación puede estar provocada por una mala elección de los parámetros de los equipos de perforación (una excesiva fuerza de empuje puede provocar desviaciones, por ejemplo) o bien por motivo de la geología del macizo, ya que las fracturas del macizo son zonas de debilidad que hacen que la barrena de perforación escoja ese camino para la perforación del barreno.

Para determinar le dirección real de los barrenos se utilizan diversos sistemas aunque el procedimiento empleado es similar. Consiste en introducir una sonda en el interior del barreno dotada de dos inclinómetros o brújulas que nos van a indicar la desviación en función de la profundidad.

La sonda puede introducirse en el barreno por medio de barras rígidas articuladas o bien por medio de elementos flexibles.



Figura 6: Sonda de determinación de dirección de barrenos con cable

Una mala perforación da lugar a posibles zonas sobrecargadas de explosivos, pudiendo provocar proyecciones, o bien a zonas donde la piedra real es demasiado grande, de modo que aparezcan repiés en el pie de banco de la cantera.

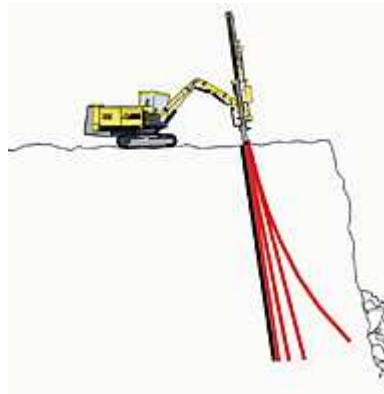


Figura 7: Desviación de la perforación y su influencia en la piedra de la voladura

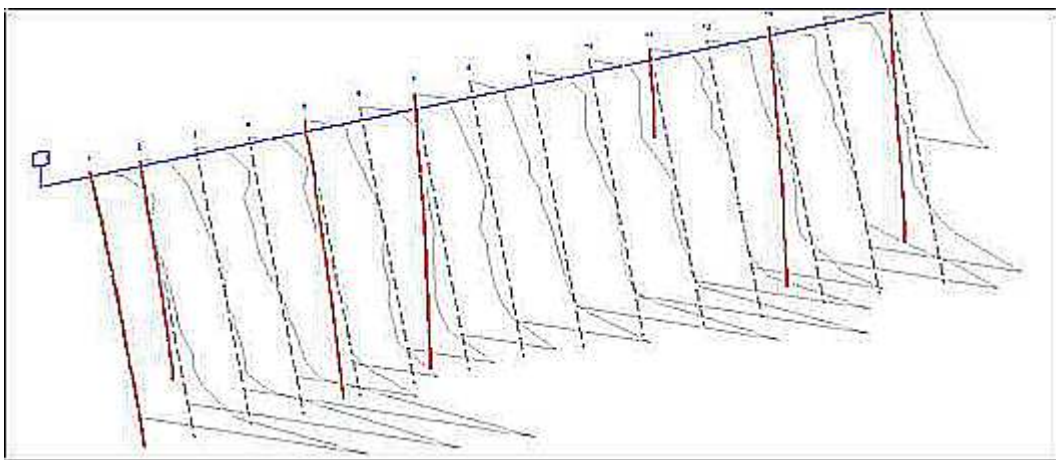


Figura 8: Resultados de la determinación de la dirección real de los barrenos (Vista 3D)

Simulación de la voladura

Una vez recogidos los datos expuestos anteriormente y junto con los parámetros geomecánicos del macizo rocoso es posible emplear herramientas que hagan una simulación de la voladura para poder predecir los resultados de la misma.

Existen herramientas basadas en programas informáticos que, mediante la aplicación de modelos teóricos es posible ajustar los parámetros de diseño de la voladura.

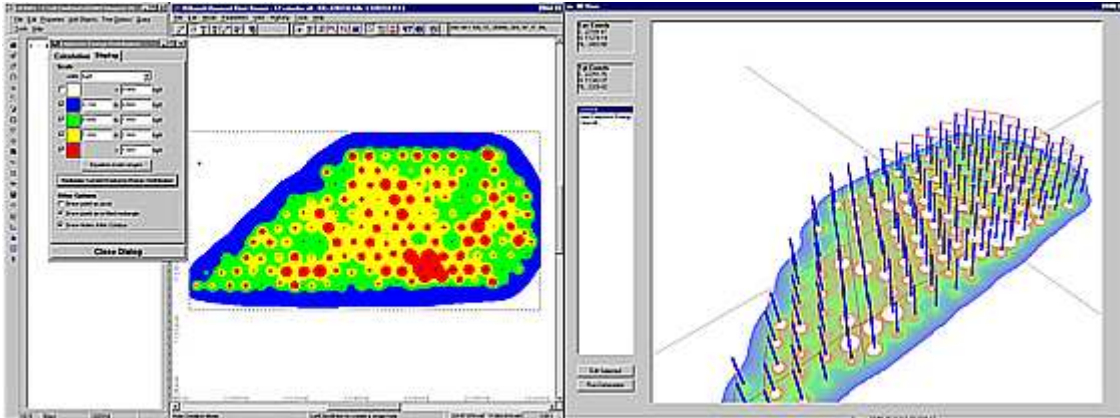


Figura 9: Distribución energética de la voladura (en rojo puntos de sobrecarga de explosivo)

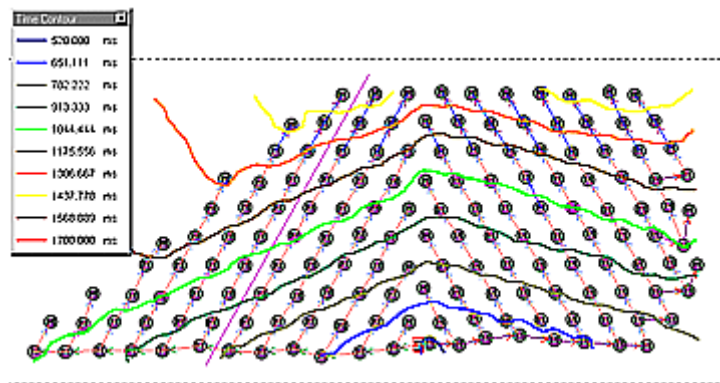


Figura 10: Simulación de los frentes de voladura en función de la secuenciación.

Herramientas a emplear durante la voladura.

Durante el desarrollo de la voladura es posible emplear herramientas que nos ayuden a evaluar los resultados de una voladura, de modo que podamos actuar en consecuencia si es necesario, en función de los resultados obtenidos.

Las herramientas van a basarse en el estudio del comportamiento del explosivo dentro del barreno y en un control visual de la voladura para detectar posibles puntos de actuación, mediante la adquisición digital de imágenes.

Medición de la velocidad de detonación.

Aunque la velocidad de detonación de un determinado explosivo es un parámetro proporcionado por el fabricante, éste dato se ha determinado mediante ensayos normalizados, para permitir la comparación de este dato entre diferentes explosivos. Las condiciones reales de uso del explosivo son dependientes de muchos factores que, en muchos casos, no podemos controlar. Este es el caso por ejemplo de la presencia de agua en los barrenos, humedad de los barrenos y afecciones de un barreno sobre otro adyacente, entre otros. Por este motivo es muy interesante determinar la velocidad real de detonación en una voladura.

Uno de los sistemas empleados para este fin es la colocación de un cable a lo largo del barreno de modo que este se vaya destruyendo por efecto de la detonación del barreno, registrando la variación de resistencia del mismo, por medio de equipos apropiados. Este cable es un cable coaxial de resistencia calibrada y el equipo de registro es un generador de corriente continua que registra, como se ha dicho, la variación de resistencia del circuito.

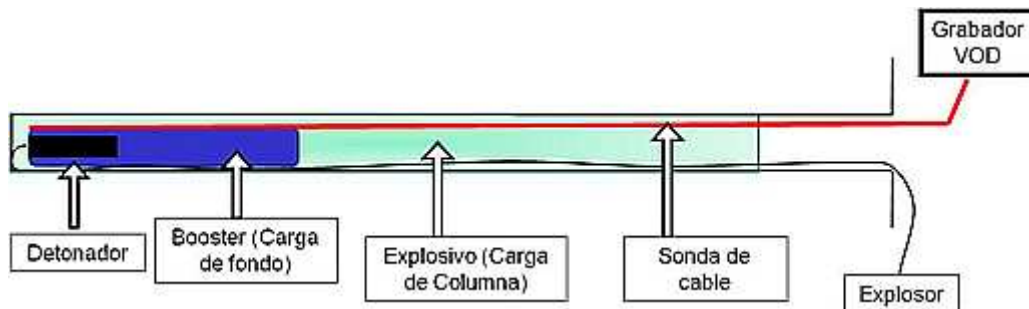


Figura 11: Diagrama de funcionamiento de la medición de velocidad de detonación

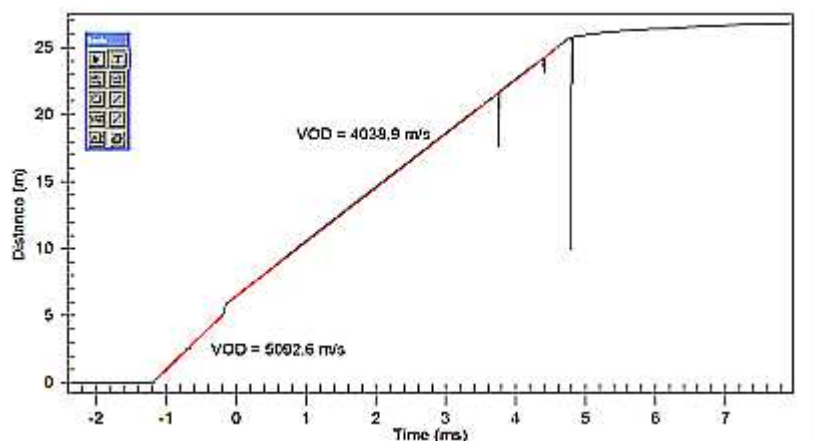


Figura 12: Ejemplo de resultado de medida de la velocidad de detonación

Grabación de la voladura mediante cámara de alta velocidad.

Como la duración a cielo abierto de una voladura está entre unas décimas de segundo hasta unos pocos segundos, el ojo humano no es capaz de diferenciar algunos de los fenómenos

que se producen durante la misma. Es importante recordar que los barrenos están secuenciados del orden de milisegundos (0,001 segundos).

Para poder detectar posibles efectos que pasan desapercibidos es posible grabar la voladura con cámara de alta velocidad, de modo que pueden registrarse hasta 1000 imágenes por segundo (fps). Una vez captada esa imagen, se reproduce la voladura a 10, 30 ó 100 fps, por ejemplo, de modo que podamos detectar fallos de secuenciación, escape de gases por el frente, efectividad del retacado, movimiento de la pila de material volado...

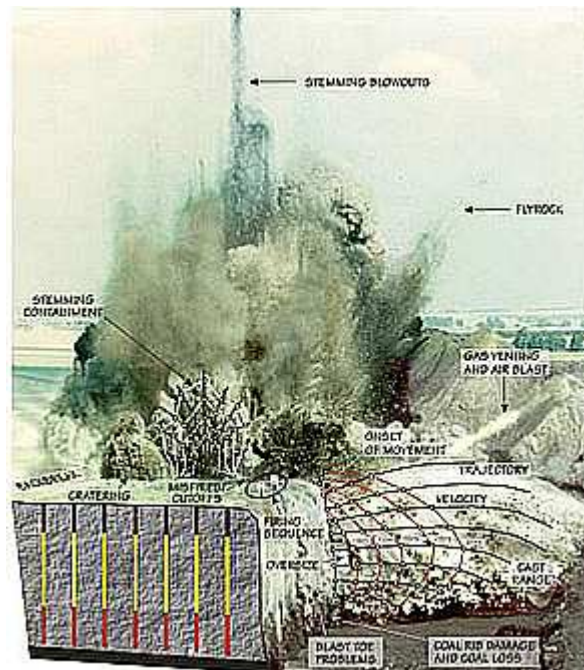


Figura 13: Parámetros observables en una grabación con cámara de alta velocidad

Herramientas a emplear después de la voladura.

Una vez realizada la voladura es necesario analizar si los resultados obtenidos se corresponden con los esperados.

Una mala fragmentación puede hacer necesario la realización de voladuras secundarias o taqueos, o bien, la necesidad de romper los sobretamaños mediante medios mecánicos, con el sobrecoste añadido que supone.

El tamaño máximo deseado en voladuras a cielo abierto en canteras de áridos vendrá definido por la capacidad de la planta de tratamiento, en concreto por el tamaño máximo de admisión del triturador primario.

Del mismo modo, con una fragmentación adecuada es posible la optimización de los equipos de carga y transporte, pudiendo trabajar ambos a plena capacidad, sin pérdidas de tiempo de ciclo ni viajes a media carga por tener que transportar grandes bloques de roca.

Otro aspecto que optimiza del mismo modo la carga del material volado es la posición de la pila después de la voladura. Dependiendo del tipo de equipo de carga disponible es preferible una posición de pila de material volado diferente. Así, para la carga de material

mediante pala cargadora es preferible una pila extendida y para el empleo de retroexcavadora la carga óptima se corresponde con una pila más compacta y elevada.

Estos aspectos descritos se pueden analizar mediante estudios de fragmentación y herramientas para el análisis del movimiento de la pila de material durante la voladura.

Análisis de la granulometría de la voladura.

Un parámetro que va a definir el resultado de una voladura es la granulometría de la pila de material volado. La manera más exacta de conocerlo es saber las distintas fracciones que entrar a la planta de tratamiento y separar por medio de diferentes precibados las fracciones de interés. Pero este proceso no es nada operativo ya que las plantas de tratamiento en canteras de áridos no suelen poseer la disposición adecuada para este fin, además de la necesidad de trabajar de modo discontinuo. Por otro lado una misma planta de tratamiento es normal que procese el material procedente de las diferentes voladuras de diferentes bancos de una misma cantera.

Por estos motivos es muy útil el conocer de forma previa la granulometría de una pila de material volado. Existen herramientas que proporcionan de manera aproximada la granulometría de la voladura, mediante la adquisición digital de imágenes y el procesamiento de las mismas. El análisis consiste en la toma de imágenes de la pila, cubriendo cada una de las fracciones representativas de la voladura y, mediante programas adecuados, se determinan la distribución granulométrica de cada fotografía, obteniendo así una curva granulométrica de la voladura.

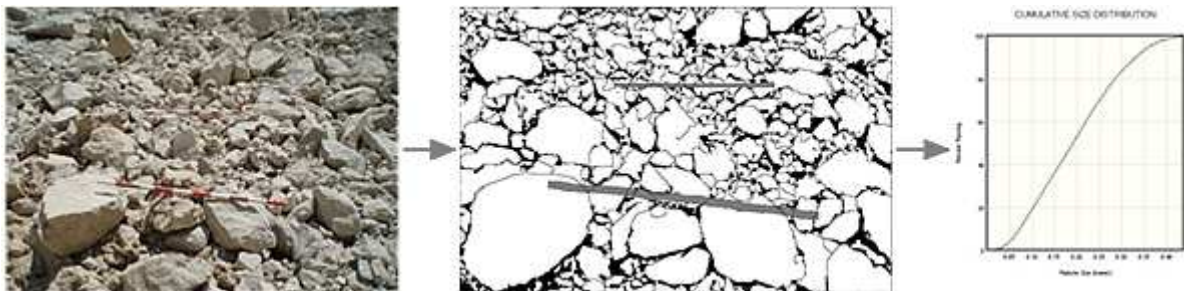


Figura 14: Secuencia de trabajo del análisis de fragmentación

Afecciones medioambientales

En el momento de aplicar los modelos teóricos se debe tener en cuenta las posibles limitaciones medioambientales que son frecuentes encontrar en explotaciones mineras a cielo abierto por la existencia de elementos sensibles a las voladuras: edificaciones cercanas, núcleos de población, infraestructuras...

Las afecciones medioambientales pueden tener los siguientes caracteres:

Vibraciones terrestres

Onda aérea

Proyecciones

Las vibraciones terrestres pueden predecirse mediante un estudio previo de vibraciones que consiste en establecer un modelo el terreno, para obtener así un ley de amortiguación de las ondas sísmicas, pudiendo determinar la carga operante máxima en cada voladura.

Con esta carga operante conocida, es posible determinar la secuencia óptima para que el solapamiento de las ondas sísmicas generadas por cada detonación sea lo menor posible

CONCLUSIONES

En este documento se han mostrado herramientas existentes para poder diseñar, analizar y evaluar voladuras en canteras de áridos de modo que se puedan detectar puntos críticos a modificar para poder así lograr la optimización de los métodos de explotación.

BIBLIOGRAFÍA

Castilla, J., (2008), "Technical Services for Blast Design, Drilling and Blasting Technologies Conference. MARE (Hungarian Society for Drilling and Blast). Vac. Hungary.

Thomas C. et al. (2007): The use of Instrumentation to improve Blasting Performance, Optimization of Blasting Operations Course. Department of Mining Engineering. Queen's University of Kingston, Ontario, Canada.

Floyd, J., (2002), "Efficient Blasting Techniques", Blast Dynamics Inc., Colorado, USA.