



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

Area de Seguridad Minera

*"CALCVOL"*

CALCULO Y DISEÑO  
DE VOLADURAS

39

01039

El Instituto Tecnológico GEOMINERO de España, ITGE, que incluye, entre otras, las atribuciones esenciales de un "Geological Survey of Spain", es un Organismo autónomo de la Administración del Estado, adscrito al Ministerio de Industria y Energía, a través de la Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales (R. D. 1270/1988, de 28 de octubre). Al mismo tiempo, la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica le reconoce como Organismo Público de Investigación. El ITGE fue creado en 1849.

# ***CALCVOL***

Cálculo y Diseño de Voladuras

Manual del usuario.

**01039**

*El "PROGRAMA DE CALCULO Y DISEÑO DE  
VOLADURAS ASISTIDO POR ORDENADOR" ha  
sido realizado por **CONSULTING DE INGENIEROS  
Y ECONOMISTAS, S.A. (C.I.E.C.S.A.)** en régimen de  
contratación con el **INSTITUTO TECNOLÓGICO  
GOMINERO DE ESPAÑA.***

El día 31 de julio de 1987, el Consejo de Ministros aprobó el **PLAN DE SEGURIDAD MINERA**; en dicho Plan se hace mención específica al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), hoy **INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (ITGE)**, para que dedique una especial atención a los temas de **SEGURIDAD MINERA**.

Es bien cierto que cuando se habla de seguridad en la minería, la sociedad lo identifica con la minería subterránea y más concretamente con la minería del carbón, cosa comprensible si se tienen en cuenta las, en general, difíciles condiciones de trabajo, las características geológicas y geotécnicas de nuestros yacimientos, el pueblo minero y las horas trabajadas en este tipo de minería. La estadística de accidentes mortales en el período 1983-1987, así lo corrobora: 298 accidentes mortales, de los cuales corresponden a minería del carbón (69,79%).

Si lo anterior es cierto, no lo es menos el gran desarrollo que han tenido en los últimos años las explotaciones a cielo abierto, y especialmente las canteras como consecuencia por una parte, de una creciente demanda en el mercado de las rocas ornamentales e industriales y, por otra, al papel que han jugado la Administración Central y las CCAA en la investigación de estos recursos.

Es fácil comprender que, asociado a lo anterior, se ha incrementado sustancialmente la utilización de maquinaria pesada de arranque, carga y transporte, el uso de explosivos, la electrificación de explotaciones e instalaciones, etc..., así como la presencia y permanencia de medios humanos en los procesos de producción y elaboración.

Todo ello se traduce en un aumento potencial del riesgo, lo que hace necesario un mayor control de todo lo relativo a los aspectos de seguridad. Dicho control, entre otros aspectos, debe basarse en el cumplimiento de la Reglamentación y Legislación Minera y en la formación técnica del personal, a todos los niveles.

La estadística para el período referido anteriormente, 1983-87, pone de manifiesto lo antedicho, si se tiene en cuenta que hubo un total de 44 accidentes mortales en canteras (14,76% del total), y que en algunos años (1983 y 1987) la tasa de accidentes (n.º de muertos/millones de horas trabajadas) con valores respectivos de 0,54 y 0,57, fue superior a los correspondientes a la minería del carbón.

El Programa de cálculo y diseño de voladuras asistido por ordenador, que aquí se presenta, está enfocado como una herramienta de uso cotidiano para ser utilizada por los profesionales que desarrollan su actividad en el campo de voladuras. Con su cumplimiento, el **INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA** desea cumplir el doble objetivo de asistencia técnica y de mejora en la seguridad del sector minero nacional.

EMILIO LLORENTE GOMEZ

DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO  
GEOMINERO DE ESPAÑA.

## EQUIPO DE TRABAJO.

El trabajo ha sido desarrollado bajo la supervisión de:

D. JESÚS GÓMEZ DE LAS HERAS. (I.T.G.E.)

DIRECTOR DEL TRABAJO:

D. MIGUEL ABAD FERNÁNDEZ. (I.T.G.E.)

EQUIPO DEL PROYECTO:

D. RICARDO VALLEJO.

D. LUIS FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ DEL ÁLAMO.

También han colaborado con sus aportaciones y sugerencias los autores del *"Manual de Perforación y Voladura de rocas"*

D. CARLOS LÓPEZ JIMENO y D. EMILIO LÓPEZ JIMENO.  
Doctores Ingenieros de Minas.

## INDICE

1.-INTRODUCCION .....	9
2.-INSTALACION DEL PROGRAMA .....	9
3.-ARRANQUE DEL PROGRAMA .....	10
4.-VOLADURAS EN BANCO .....	13
4.1. Voladuras de pequeño diámetro .....	13
4.2. Voladuras de gran diámetro .....	15
5.-VOLADURAS DE CONTORNO .....	16
6.-VOLADURAS EN ZANJA .....	18
7.-VOLADURAS EN RAMPA .....	19
8.-VOLADURAS DE ESCOLLERA .....	20
9.-VOLADURAS DE NIVELACION .....	21
10.-CALCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO DE VOLADURA Y SELECCION DEL EXPLOSOR .....	23
11.-PREDICCION TEORICA DEL NIVEL DE VIBRACIONES TERRESTRES .....	24
12.-PRECIOS DE LOS EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS .....	25

### **NECESIDADES DE HARDWARE:**

Los equipos informáticos que se precisan para utilizar el programa "CALCVOL" son los siguientes:

- Ordenador tipo IBM PC o compatible
- Memoria RAM 512 Kb
- Unidad de disco de 360 Kb o 1,2 Mb
- Opcionalmente, si se desea obtener los resultados por escrito, se debe disponer de una impresora matricial o de otro tipo.

## 1.-INTRODUCCION

Tras la buena acogida que ha tenido entre los técnicos españoles y extranjeros el "Manual de Perforación y Voladura de Rocas" publicado en 1987, el ITGE ha dado un paso más en la actualización de las tecnologías en el citado campo mediante la elaboración de los programas de diseño y cálculo de las principales voladuras que se realizan en trabajos a cielo abierto, el cálculo de la resistencia eléctrica total de un circuito de voladura y selección del explosor, y la predicción analítica del nivel de vibraciones terrestres.

Los fundamentos teóricos y los métodos de cálculo son los recogidos en el citado Manual, por lo que en esta publicación sólo se señalarán aquellos aspectos que se consideren de interés para el manejo del programa.

Los conocimientos que se precisan de informática son mínimos, ya que el programa queda perfectamente ilustrado por medio de ventanas y pantallas con todas las variables y parámetros que intervienen, así como con otros complementarios.

Por otro lado, cabe indicar la novedad que supone la realización de un programa "inteligente" por cuanto se detectan aquellos datos y soluciones que si bien son válidas matemáticamente se encuentran fuera de la buena práctica del arranque de rocas con explosivo.

Por último, además de diseñarse geoméricamente las voladuras y determinar las cantidades de explosivo en cada tipo de pega se han preparado unos módulos de cálculo de costes que permiten una rápida elaboración de los presupuestos y planificación del arranque.

## 2.-INSTALACION DEL PROGRAMA

El programa se presenta en un disco de 5 1/4" de 360 Kb. Se puede trabajar introduciendo el disco en la unidad correspondiente, pero se aconseja que se cargue en un subdirectorio apropiado del disco duro.

Para ello se sugiere proceder de la siguiente forma:

1. Introducir el disco de programa en la unidad correspondiente, generalmente en la unidad A.
2. Creación de un directorio. Se teclea la orden: C > md voladura < Retorno >, con lo que se crea el subdirectorio denominado "Voladura". Naturalmente, en caso de desearlo, el subdirectorio pue-

de nombrarse de cualquier otra forma, respetando las reglas de sintaxis del sistema.

3. Carga del programa. Para copiar el programa en el disco duro se procede a teclear la siguiente orden:

```
C> COPY A:*.* C:\VOLADURA <Retorno>
```

Una vez que se ha procedido a la carga del programa en el disco duro, se aconseja retirar y guardar convenientemente el disco del programa.

### 3.-ARRANQUE DEL PROGRAMA

Una vez que se ha instalado el programa en el disco duro (o bien desde la unidad A, en su caso) hay que situarse en el subdirectorio, mediante la orden C> CD VOLADURA <Retorno>. El arranque del programa se realiza por medio de:

```
C:\VOLADURA > CALCVOL <Retorno>
```

Cuando se introduce esta orden, aparece la pantalla de presentación que da paso al programa, el cual ofrece una serie de opciones, a través de un "menú" tal como aparece en la figura 1. (La pantalla de presentación puede interrumpirse a voluntad, presionando cualquier tecla.)

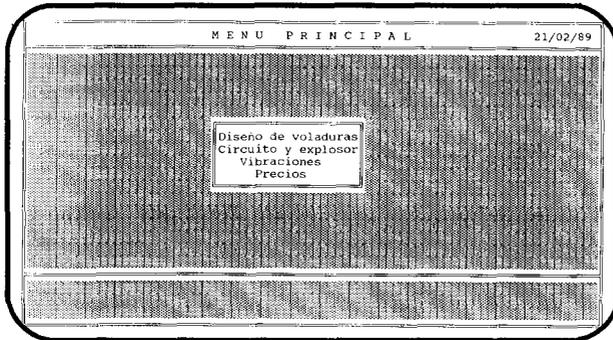


Fig. 1

Desde aquí, mediante el empleo del cursor se pueden optar por trabajar en el diseño de voladuras, en el cálculo de la resistencia del circuito y selección del explosor, en el estudio de las vibraciones o en la actualización y consulta del archivo de precios que el programa lleva incorporado.

Al seleccionar la primera opción, manejando el cursor hasta que se resalte la frase **DISEÑO DE VOLADURAS** y presionando la tecla RETORNO, aparece una pantalla (figura 2) que permite seleccionar a su vez las distintas modalidades de trabajo. Como puede apreciarse, el Programa permite el diseño de voladuras en banco; de contorno, en zanja, en rampa, en escollera y de nivelaciones. Cada una de las opciones puede seleccionarse por medio de los cursores.

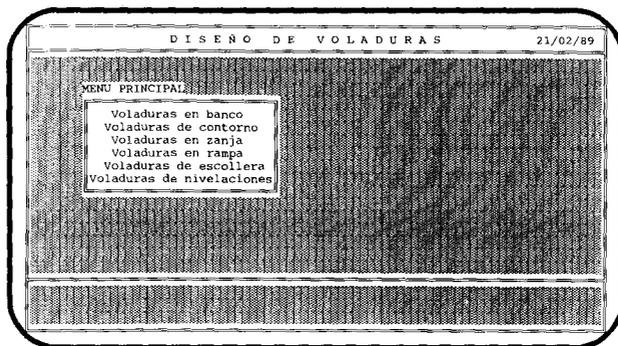


Fig. 2

La selección de la segunda opción del menú principal: **CIRCUITO Y EXPLOSOR** permite la aparición de la siguiente pantalla (figura 3) que ofrece la posibilidad de calcular la resistencia de un circuito en serie, en paralelo, mixto (MIX DEF.) o que el propio ordenador calcule y diseñe el circuito mixto serie-paralelo más adecuado a las necesidades de la voladura proyectada.

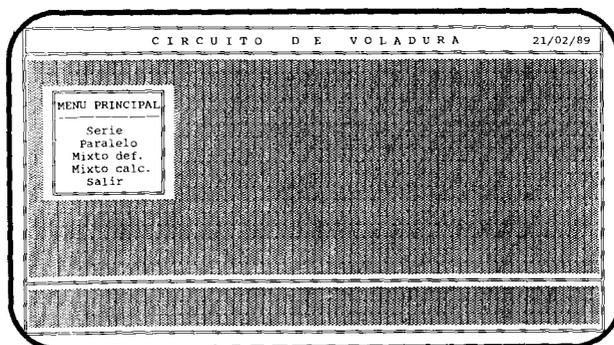


Fig. 3

La tercera opción, **VIBRACIONES**, conduce a un subprograma de cálculo (figura 4) que permite conocer los efectos de la voladura a una distancia determinada, en un intervalo de distancias, o estimar la distancia mínima a la que se producirá un nivel preestablecido de vibraciones. El programa permite estimar la carga máxima que debe ser empleada en una voladura determinada para no sobrepasar un nivel de vibraciones a una distancia cualquiera establecida.

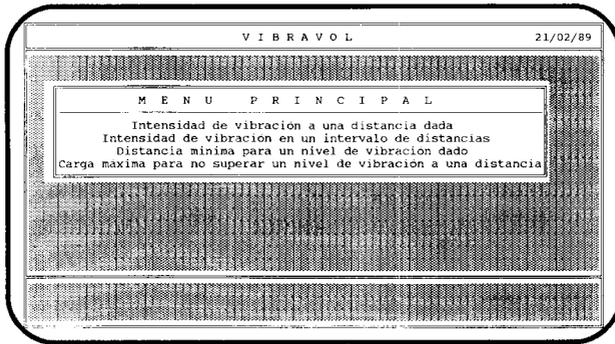


Fig. 4

La última opción del programa principal **PRECIOS** permite consultar y actualizar el archivo de precios incorporado como ayuda al Programa.

Una vez seleccionada esta opción, aparece una pantalla desde la que se pueden realizar las siguientes operaciones: Obtener un listado por impresora de todos los datos del archivo; consultar uno a uno los datos del archivo mediante las opciones Avanzar o Retroceder. Actualizar es una opción que permite introducir cambios en una ficha predeterminada.

Para elegir la ficha que se desea alterar, **debe teclearse el nombre exactamente como se encuentra archivado**, ya que si no es así, el programa emitirá un aviso de que no existe tal registro en su memoria. Esto exige emplear las mismas mayúsculas, minúsculas y espaciamientos que los empleados para dar de alta a una ficha. Las opciones de alta y baja posibilitan respectivamente la incorporación de nuevos registros al fichero o retirar los que se han quedado inservibles.

Cuando se introduce un valor anómalo o inusual en cualquiera de los diferentes subprogramas, el ordenador emite una señal acústica y en la parte inferior de la pantalla aparece un rótulo intermitente de error o de advertencia. *El programa queda bloqueado hasta que se presione una tecla cualquiera.* En ese momento se puede corregir el dato erróneo o aceptar el dato anómalo causante de la advertencia.

#### 4.-VOLADURAS EN BANCO

Las voladuras en banco convencionales constituyen el procedimiento más utilizado para la fragmentación y esponjamiento de la roca. La perforación se realiza verticalmente o formando un determinado ángulo con respecto a dicha dirección y en función del diámetro de los barrenos se distinguen dos grupos de voladuras:

- Voladuras de pequeño diámetro ( $< 165$  mm)
- Voladuras de gran diámetro ( $> 165$  mm)

Tras elegir el grupo deseado, aparece una pequeña ventana donde se indican los métodos de cálculo programados.

##### 4.1. Voladuras de pequeño diámetro

###### A.-Método de Langefors

Es el conocido por "método sueco" que se viene empleando desde los años 60 con mucha frecuencia, sobre todo en el campo de las rocas duras y compactas. En la primera pantalla aparecen los grupos de variables que intervienen en el diseño de la voladura.

Algunos aspectos que consideramos de interés en la introducción de los datos son los siguientes:

- El ángulo que forman los barrenos con respecto a la vertical debe estar comprendido entre  $0^\circ$  y  $45^\circ$
- El programa avisa de los valores no usuales de la relación espaciado/piedra. Los más habituales son los comprendidos entre 1 y 1.4.
- La desviación de los barrenos está limitada entre el 0 y el 10%.
- Las constantes de rocas varían entre 0,2 y 1,2.
- Se impone la introducción de cargas de explosivo con diámetros menores a los del barreno.

- Se avisa de valores no usuales de carga y potencia relativa del explosivo por unidad de peso.

Después de contestar afirmativamente a la pregunta de si son correctos los datos aparecen los resultados en otra pantalla divididos en tres grupos: de diseño geométrico, de carga de explosivo y consumo específico y complementarios. En ese momento se pueden imprimir los resultados o bien pasar al siguiente módulo de cálculo de costes. Si se elige la primera opción, una vez conectada la impresora, se escribirán todos los datos de diseño y resultados obtenidos. (Figura 5)

VOLADURAS EN BANCO		21/02/89	
Piedra máxima (m).....	2.8	Carga fondo por barreno (kg):	31.6
Piedra práctica (m).....	2.4	Longitud carga de fondo (m):	3.7
Espaciamiento (m).....	2.6	Carga de fondo total (kg)...	9350
Sobreperforación (m).....	0.8	Carga columna por barreno(kg):	95.6
Retacado (m).....	2.4	Longitud carga columna (m)...	15.2
Longitud de barreno (m).....	20.8	Carga columna total (kg)...	28303
Vol. arrancado por barreno(m3):	126	Consumo específico (kg/m3):	1.010
-----			
Numero de filas.....	8	Volumen total arrancado(m3):	37277
Numero de barrenos por fila...	37	Long. total perforada (m):	6171
Numero total de barrenos.....	296	Rendimiento de arranque(m3/ml):	6.04
Anchura real arrancada (m)...	19.1		
-----continua Imprimir Costos			

Fig. 5

Si la opción elegida es la de costes, en la primera pantalla se introducirán los datos referentes a: coste del metro lineal perforado, precios de los explosivos de fondo y columna y precios de accesorios de iniciación. El programa ofrece una ayuda para recordar los precios que previamente se han introducido en un archivo que permite su actualización a voluntad del usuario. La tecla F3 muestra una pequeña ventana en la que es posible visualizar los datos de costes más usuales, aunque esto solamente es posible estando en una pantalla de entrada de datos. En la siguiente pantalla aparecerán los costes totales de la voladura, distinguiendo: perforación, accesorios de iniciación y explosivo. El último valor es el del coste del metro cúbico volado, sin incluir la mano de obra cuya repercusión, si fuera necesario, puede tenerse en cuenta a través del precio de explosivo. Por último, existe la posibilidad de sacar por impresora el informe de costes con todos los datos indicados.

### B.-Método de López-Jimeno

Es el método recogido en el "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", válido para cargas cilíndricas con una relación "L/D > 100". Se caracteriza por su simplicidad y pragmatismo, ya que la mayoría de los

parámetros de cálculo se refieren al diámetro de los barrenos.

Una vez que aparece la primera pantalla, los aspectos más relevantes a destacar son:

- Se limita la inclinación de los barrenos entre 0 y 45°
- En función del diámetro de perforación se aconseja la altura de banco.
- La roca se define por su resistencia a la compresión simple en MPa, eligiéndose el grupo al que pertenezca. El programa permite visualizar una ventana de recordatorio.
- Se detectan los diámetros de carga mayores que los del barreno donde deben alojarse.

Los resultados de diseño obtenido son similares a los del método de Langefors, y el cálculo de costes de la voladura se realiza de la misma forma.

#### 4.2. Voladuras de gran diámetro

En este grupo de voladuras se considera que toda la perforación se efectúa mediante barrenos verticales.

##### A.-Métodos de Ash

Este método ha sido, desde hace varias décadas, el más utilizado en el mundo sajón para el diseño de grandes voladuras en banco. Se basa sobre un amplio conjunto de relaciones empíricas obtenidas de experiencias reales.

En la primera pantalla se introducen los principales datos geométricos, de la roca y del explosivo.

Para las relaciones: retacado/piedra, espaciamento/piedra y sobreperforación/piedra, si se eligen valores apartados de la buena práctica salen avisos de advertencia. De igual forma sucede cuando la relación entre la altura de banco y la piedra está fuera del rango óptimo.

En lo que respecta a los tipos de roca se elige uno de los tres grupos posibles en función de su resistencia. El tipo de explosivo se define por su densidad. Los resultados aparecen en la pantalla siguiente con un formato similar al del resto de los métodos comentados.

El módulo de costes es igual al expuesto para barrenos de pequeño diámetro.

### B.-Método de E. López-Jimeno

Es un método basado en principios similares al anterior, pero mejorado, ya que la roca queda caracterizada por su densidad y por la velocidad de propagación sísmica de las ondas en el macizo rocoso. Por otro lado, permite definir configuraciones de cargas selectivas y constituidas por dos explosivos de propiedades distintas.

La geometría de la voladura y diseño de las cargas quedan visualizados en una pantalla igual a la del método anterior. Los costes se estiman también por el mismo procedimiento.

### C.-Método de López-Jimeno

El sistema de cálculo es semejante al expuesto para barrenos de pequeño diámetro. En este caso es preciso especificar la longitud de la carga de fondo, que suele variar entre 8 y 16 D, y el tipo de explosivo que constituye la carga de columna, además de su densidad. La roca queda definida por el grupo al que pertenece en función de su resistencia a la compresión en MPa.

El último módulo es igual al de los métodos precedentes y permite calcular el coste del metro cúbico fragmentado.

## **5.-VOLADURAS DE CONTORNO**

Seleccionado este grupo de voladuras en el menú principal, aparecen dos opciones:

- Voladura de precorte
- Voladura de recorte

Se elige el tipo deseado, y aparecen en la primera pantalla las variables geométricas, del explosivo y de la roca que deben definirse. Es de destacar el hecho de que ese último grupo de datos citado puede no conocerse, total o parcialmente, y aún así calcular el diseño de la voladura y estimarse indirectamente las resistencias a compresión y a tracción de las rocas para las que se obtendrían unos resultados óptimos. Lo mismo sucede con el diámetro de la carga de explosivo que, aunque no se conozca es posible determinarlo a partir de una expresión empírica y calcular entonces las restantes variables de diseño.

Cuando los datos introducidos, en cualquiera de los dos tipos de vola-

duros, dan unos resultados acordes con la práctica habitual se pueden imprimir o bien pasar al módulo de costes.

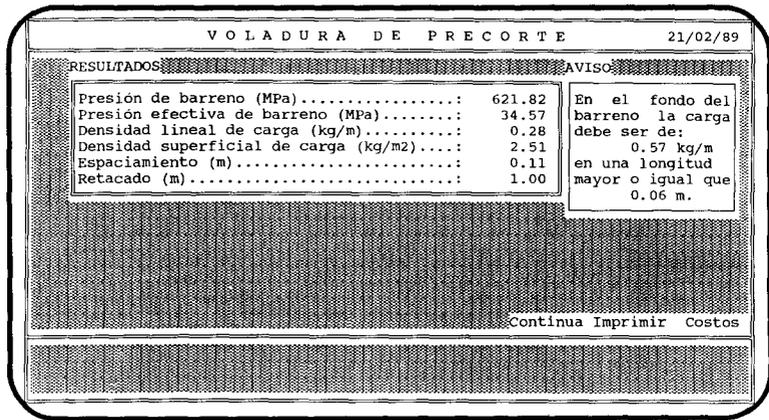


Fig. 6

Si por el contrario, con las variables definidas se determinan situaciones anómalas como pueden ser espaciamentos teóricos fuera del intervalo óptimo en la práctica, densidades de carga de explosivo muy superiores a las habituales o riesgo de trituración de la roca de la caña de los barrenos, aparecerán nuevas pantallas de aviso sobre las cuales es posible modificar alguna de las variables de entrada, hasta conseguir un diseño de la voladura adecuada. (Figura 6.)

En el módulo de costes existen dos pantallas, una para la introducción de datos y otra para la obtención de los resultados. En la primera se define el plano de precorte o recorte por su longitud y altura media, el coste de perforación de los barrenos, el precio de los accesorios de iniciación por barreno y el precio del kilogramo de explosivo. En caso de utilizar cordón detonante se calculará el precio del explosivo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Precio del metro } x \text{ de cordón detonante} \times \frac{1.000}{\text{Gramaje del cordón empleado}}$$

Los resultados de costes aparecerán en la siguiente pantalla, pudiendo entonces continuar con un nuevo cálculo de voladura o escribiendo los resultados mediante la impresora.

## 6.-VOLADURAS EN ZANJA

Se denominan zanjas a aquellas obras lineales de superficie con una anchura comprendida entre 0,8 y 3 m y una profundidad que puede oscilar entre 0,5 y 5 m.

El mayor confinamiento de la roca obliga a utilizar consumos específicos de explosivo más elevados que en las voladuras en banco convencionales.

Tras elegir en el menú el tipo de voladuras en zanja, se introducen los datos de partida en la primera pantalla, siendo de destacar los siguientes aspectos:

- Se recomiendan mediante una ventana auxiliar los diámetros de perforación, en función de las dimensiones de la zanja.
- Se indican cuáles son las inclinaciones habituales de los barrenos en este tipo de trabajos.
- Se detectan diámetros de carga mayores que los de barreno.
- El explosivo de columna elegido puede ser encartuchado o a granel.
- El tipo de roca se define por su resistencia a la compresión, existiendo dos grupos según que ésta sea menor o mayor a 120 MPa.

El diseño de la voladura, tanto geométrico como de carga de explosivo, aparece en la siguiente pantalla junto a otros datos de interés. (Fig. 7.)

VOLADURAS EN ZANJA		21/02/89	
Piedra (m).....	1.45	Longitud de barreno (m)..	2.65
Sobreperforación (m).....	0.53	Nº de barrenos.....	272
Espaciamento (m).....	0.77	C. fondo centrales (kg)...	1.02
Espac. barrenos contorno (m):	0.62	C. fondo contorno (kg)...	0.72
Retacado (m).....	1.37	Longitud de carga (m)....	1.27
Nº de filas.....	4	Carga total (kg).....	237
Longitud real de zanja (m).....	98.7		
Volumen nominal arrancado (m3)....	400		
Volumen real arrancado (m3).....	494		
Longitud total perforada (m).....	721		
Número de barrenos por fila.....	68		
Consumo específico (kg/m3).....	0.600		
.Continua Imprimir Costes			

Fig. 7

En zanjas con dimensiones reducidas la configuración de las cargas de explosivo puede ser tal que no exista carga de columna.

El volumen nominal arrancado se calcula para una sección de la zanja rectangular, mientras que el volumen real arrancado corresponde a una sección trapezoidal con taludes 4:1 que es la que se produce habitualmente.

El consumo específico está referido al volumen nominal, mientras que el coste del metro cúbico lo está al volumen real.

Los resultados pueden sacarse por impresora o bien para el módulo de costes.

## **7.-VOLADURAS EN RAMPA**

Se utilizan en la apertura de nuevos niveles en las explotaciones a cielo abierto.

El método de cálculo empleado es el de Chung, que se basa en el dimensionamiento de las cargas de explosivo para que éstas actúen como esféricas. Los datos de entrada son los que se indican en la primera pantalla.

Como lo habitual es ejecutar este tipo de voladuras con grandes diámetros, se considera que únicamente se emplea una clase de explosivo, generalmente ANFO, iniciado con multiplicadores.

Dado que a una determinada distancia del extremo superior de la rampa se interrumpen los cálculos, ya que las cargas quedarían muy superficiales al no existir casi retacado, existe la posibilidad de repetir la última fila calculada un determinado número de veces, que es lo que se realiza en la práctica con el apoyo de un tractor de orugas.

Después de especificar el número de veces que se repite la citada fila aparecen en una ventana central: el número total de barrenos, la carga total de explosivo utilizada y la longitud total perforada.

El aspecto de la pantalla se muestra en la Figura 8.

El coste total de la voladura se calcula con el módulo siguiente, previa introducción de los precios de los explosivos y coste del metro perforado.

VOLADURAS EN RAMPA							21/02/89
Fila	Distancia (m)	L. barreno (m)	Piedra (m)	Sobreperf. (m)	N°barrenos	Long. Carga (m)	Cant. Expl. (kg)
92	32.42	3.49	1.65	0.25	7	0.99	7.78
93	30.77	3.32	1.65	0.25	7	0.82	6.48
94	29.13					0.66	5.18
Número de barrenos totales.....					584		
Carga total (kg).....					39362		
Longitud total perforada (m)....					6472		
Continúa Imprimir Costes							

Fig. 8

## 8.-VOLADURAS DE ESCOLLERA

Este tipo de voladuras se utiliza para producir bloques de grandes dimensiones.

Los dos objetivos de este tipo de voladuras consisten en conseguir un corte adecuado a la cota del pino y un despegue limpio a lo largo del plano que forman los barrenos, con un agrietamiento mínimo de la roca por delante de dicho plano.

Al introducir los datos en la primera pantalla, los detalles más importantes a destacar son:

- Se recomiendan diámetros de los barrenos entre 75 y 115 mm.
- La relación práctica entre la piedra y el espaciamiento varía entre 1,4 y 1,7.
- Las inclinaciones aconsejadas oscilan entre 5 y 10°.
- Las alturas de banco recomendadas están comprendidas entre los 15 y los 20 m.
- Los tipos de roca se clasifican en dos grupos, según que la resistencia a la compresión sea mayor o menor de 100 MPa.

- Se impide la introducción de diámetros de carga mayores que los diámetros de los barrenos.

Los resultados se obtienen en la segunda pantalla en la que se indica si el diámetro de columna está fuera del rango práctico. (Figura 9.)

VOLADURAS DE ESCOLLERA		21/02/89	
Piedra operativa (m).....	5.13	Longitud barreno (m).....	19.07
Espaciamiento (m).....	3.39	Longitud carga de fondo (m).....	5.50
Retacado (m).....	1.50	Carga de fondo (kg).....	47.52
Retacado intermedio (m)...	1.00	Longitud carga de columna (m)...	11.07
Sobreperforación (m).....	0.93	Carga de columna (kg).....	78.22
Carga de fondo total (kg).....		1378	Diámetro de carga de columna FUERA del RANGO PRACTICO 24.25 - 45.04 mm
Carga de columna total (kg).....		2268	
Longitud total perforada (m).....		553	
Volumen volado por barreno (m3)...		313	
Número de barrenos.....		29	
Volumen total volado (m3).....		9087	
Consumo específico (kg/m3).....		0.401	Continúa Imprimir Costes

Fig. 9.

Existe la posibilidad de sacar por impresora todos los datos y resultados recogidos en las pantallas anteriores.

Asimismo, el cálculo de costes se realiza de la misma forma que para el resto de las voladuras.

## 9.-VOLADURAS DE NIVELACION

Las voladuras de nivelación son típicas en la preparación de solares o explanaciones, donde la roca precisa para su arranque la utilización de explosivos.

Como el relieve del terreno suele ser irregular, es difícil establecer una sistemática de cálculo válida para todos los casos.

No obstante, el método utilizado parte de suponer que en el terreno se identifican diversos perfiles verticales o secciones más o menos uniformes, y de altura constante cada una de ellas, es decir, el terreno presenta un cierto escalonamiento, y en determinadas zonas esas sec-

ciones se mantienen durante una determinada anchura obligando a la repetición de varias filas iguales de voladura.

Tras definir en la primera pantalla el número de secciones de diferente altura, se introduce para cada una de ellas los datos específicos de altura, longitud y número de veces que se considera que se repite dicha sección.

Seguidamente, en la segunda pantalla se introducen los datos referentes al diámetro e inclinación de los barrenos, resistencia a compresión de la roca y explosivos.

Los aspectos más destacables son:

- Se recomienda un rango práctico de diámetros de perforación.
- Se detectan ángulos de los barrenos fuera del intervalo 0-90°
- Se define el tipo de roca por el grupo al que pertenezca en función de su resistencia a la compresión en MPa.
- Se impide la introducción de diámetros de carga mayores a los del barreno.

En la pantalla siguiente aparecen todos los valores calculados para una de las secciones. (Figura 10.)

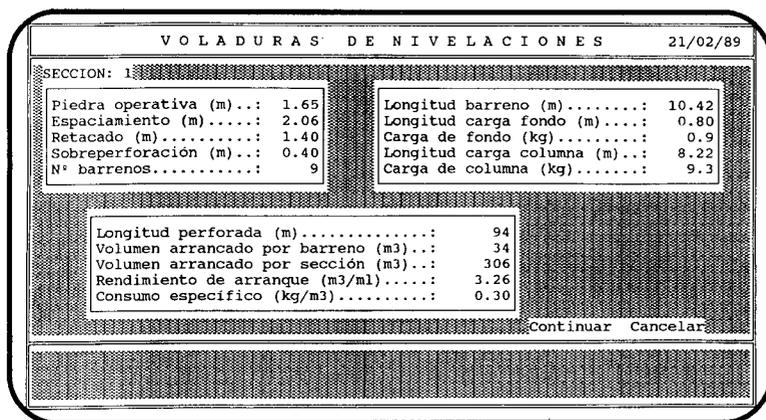


Fig. 10

## 10.-CALCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO DE VOLADURA Y SELECCION DEL EXPLOSOR

En las voladuras, los detonadores eléctricos se conectan entre sí formando un circuito que se une a la fuente de energía por medio de la línea de tiro. Este módulo sirve para calcular la resistencia total del circuito de voladura y comprobar si el explosor elegido está suficientemente dimensionado para garantizar la salida de la pega.

Una vez cargado el programa, en la primera pantalla aparece el menú principal donde se indican los tipos de circuitos que pueden estudiarse: serie, paralelo y mixto y una cuarta opción, que también corresponde a un circuito mixto que permite definir el número óptimo de series iguales en paralelo a partir de un conjunto de detonadores dado. Después de elegir la opción deseada aparecen otras ventanas, una para los valores de las distintas variables que configuran el circuito y otra de ayuda del usuario para recordarle la resistencia del puente de cada uno de los detonadores que se comercializan en España.

Tras confirmar que los datos están bien tecleados, aparece otra ventana donde hay que especificar el número de detonadores dentro del circuito de la voladura e inmediatamente después aparece la resistencia total calculada.

En el supuesto de que los detonadores utilizados no coincidieran con los recogidos en la ventana de información existe un módulo de gestión con el que pueden variarse las características de los detonadores a través del impulso de encendido que se precisa conocer en la segunda parte del programa para el cálculo del explosor.

Después de calcular la resistencia total del circuito de voladura pueden imprimirse los resultados o pasar a comprobar si el explosor elegido es válido para la realización de la pega. Si se elige esto último aparece un menú del explosor con el cual se puede, primero, visualizar las características de los explosores registrados en un fichero auxiliar, segundo, gestionar dicho fichero modificando los datos contenidos o dando de alta o de baja a algún explosor en pantalla, pasar a la segunda parte del programa mediante la opción "selección", imprimir los datos recogidos en el fichero de explosores o salir del programa.

Si se continúa con el programa se tecleará el nombre del explosor e inmediatamente después aparecerán sus características en una ventana, siendo posible variar alguno de los valores reflejados.

Después de confirmar los datos se visualizarán los resultados de los cálculos obtenidos y entre ellos el Factor de Seguridad, que en caso

de ser menor de 1 hará que aparezca una ventana de aviso de que el explosor no tiene capacidad suficiente para disparar la pega.

## 11.-PREDICCIÓN TEORICA DEL NIVEL DE VIBRACIONES TERRESTRE

La intensidad de las perturbaciones originadas por las voladuras y transmisión a través del terreno puede predecirse con el modelo teórico de G. Berta, recogido en el Manual de Perforación y Voladura de Rocas.

Con el programa **VIBRAVOL** es posible efectuar los cálculos en las opciones indicadas en el menú principal que aparece tras ser cargado.

Después de elegir la primera opción, en la segunda pantalla aparecen los grupos de variables que deben introducirse: propiedades de la roca, propiedades del explosivo y diámetros del barreno y de la carga de explosivo. En el momento de introducir la constante característica del terreno 'kf' surge una ventana con información complementaria sobre los rangos de valores típicos.

TIPO DE EXPLOSIVO	ENERGIA ESPECIFICA (MJ/Kg)
ANFOS	2,7-3
HIDROGELES	3-4
EMULSIONES	2,9
GELATINOSOS	3-5
PULVURULENTOS	1,5-3

Tras verificar que los datos son correctos se especifica la cantidad prevista de explosivo por unidad de microrretardo y la distancia a la cual se pretende efectuar la predicción del nivel de vibración.

En la pantalla siguiente se reflejan los resultados de intensidad de vibración expresados por la amplitud del movimiento, la velocidad y la aceleración de partícula. Se indica además cuál es la frecuencia de vibración más probable a esa distancia de la voladura.

La distancia mínima para la cual es válido el modelo de predicción es de 2 m.

En la segunda opción: intensidad de vibración en un intervalo de distancias, se precisa ubicar éste en el espacio y especificar cada cuantos metros se desea efectuar la estimación.

Los resultados aparecen en la pantalla siguiente, pudiendo entonces continuar con el programa e imprimir los valores obtenidos.

En la tercera opción: distancia mínima para un nivel de vibración dado, además de los datos propios de la configuración de la voladura, se establece el parámetro que limita el nivel de vibración: amplitud, velocidad de partícula o aceleración para a continuación especificar su valor numérico.

En la última opción, se calcula la carga máxima para no superar un nivel de vibración a una determinada distancia. Al igual que en el caso anterior, una vez introducidos los datos de la voladura, el umbral de daños y la distancia a la que se desea calcular la carga aparecerá en la siguiente pantalla la cantidad máxima de explosivo por unidad de microrretardo.

## **12.-PRECIOS DE EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS**

En todos los métodos de diseño de las voladuras existe un módulo de cálculo de costes. En la introducción de los datos se precisa conocer los precios de los explosivos y accesorios, así como el coste del metro perforado.

En caso de no recordar los precios vigentes, pueden hacerse aparecer éstos en una ventana auxiliar presionando la tecla "F3".

El código que se ha utilizado es el siguiente:

CD: Cordón detonante  
DE: Detonador eléctrico  
MU: Multiplicadores  
EG: Explosivos gelatinosos  
EP: Explosivos pulvulentos  
HI: Hidrogeles  
NG: Nagolitas

El fichero de precios puede gestionarse periódicamente dando de alta a otros productos nuevos, de baja a los antiguos, actualizando los

precios de los productos existentes o sacando listados de todos los datos recogidos.

Para llevar a cabo todo ello, el menú principal se debe situar el cursor en la palabra "precios" y dar a la tecla < Retorno >. Los nombres de los explosivos y accesorios archivados deben recuperarse tecleándolos **exactamente** igual que figuran en pantalla, **incluso** con los espacios en blanco y las unidades monetarias que aparecen en el extremo derecho de la pantalla.

## TABLAS DE USO CORRIENTE

Nombre Comercial		Potencia relativa — %	Densidad de encartuchado — gr/cm <sup>2</sup>	Velocidad de detonación — m/seg	Energía específica — kgm/kg	Resistencia al agua	APLICACIONES	
GELATINOSOS	Goma 1-ED	90	1,45	6.000	104.158	Muy buena	— Voladura de rocas muy duras. Su uso es más restringido que el resto de las gomas.	
	Goma 2E-C	85	1,40	5.200	100.410	Buena	— Carga de fondo de los barrenos en voladuras a cielo abierto.	
	Goma 1E-AGV	80	1,55	7.000	96.800	Muy buena	— Trabajos con grandes presiones de agua. — Prospecciones sísmicas.	
	Goma 2-BD (baja densidad)	80	1,15	5.200	98.410	Buena	— Voladuras suaves, cueles con débil concentración, precortes y recortes.	
PULVERULENTOS	Amonita 2-1	70	0,95	3.000	87.500	Buena	— Voladura de rocas semiduras y blandas.	
	Ligamita 1	77	1,10	3.300	84.600	Mala	— Voladura de rocas semiduras y blandas.	
	Sabulita 0	72	1,20	4.500	76.400	Mala	— Voladura a cielo abierto de rocas semiduras y blandas.	
EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD	Explosivos ROCA	Expl. seg. 2 bis	68	1,35	4.000	72.170	Buena	— Voladura en labores de las clases 1.ª y 2.ª. No se pueden usar en carbón.
	Explosivos CAPA	Expl. seg. 9	45	1,50	4.500	49.150	Excelente	— Voladura en capas de carbón y en rocas duras. Se pueden emplear en barrenos con con agua.
		Expl. seg. 12	55	1,01	2.500	58.310	Mala	— Voladura en rocas blandas y en carbón.
	Explosivos CAPA DE SEGURIDAD REFORZADA	Expl. seg. 20 SR	40	1,15	2.500	36.650	Mala	— Fundamentalmente, para voladuras en carbón.
	Expl. seg. 30 SR	37	1,10	2.000	30.1190	Mala	— Pueden usarse para voladura de rocas blandas.	

Fuente: Explosivos Río Tinto, S. A.

	Nombre Comercial	Potencia relativa — %	Densidad de encartuchado — gr/cm <sup>2</sup>	Velocidad de detonación — m/seg	Energía específica — kgm/kg	Resistencia al agua	APLICACIONES
ANFOS	Nagolita	65	0,80	2.000	94.400	Mala	— Voladura de rocas blandas y como carga de columna de los barrenos.
	Alnafo	75	0,80	3.000	96.100	Mala	— Voladura de rocas blandas y semiduras.
	Naurita	65	0,80	2.000	94.320	Mala	— Diseñada para barrenos con temperaturas elevadas.
HIDROGELES	Riogel 0	75	1,35	3.500	80.500	Excelente	— Voladura de rocas blandas, o como carga de columna en voladuras a cielo abierto.
	Riogel 1	80	1,17	4.300	85.750	Excelente	— Voladura de rocas semiduras como carga de fondo. — Para trabajos subterráneos, ya que tiene muy buenos gases y es sensible para usar en barrenos de 26 mm. de diámetro.
	Riogel 2	85	1,20	4.500	93.500	Excelente	— Voladura de rocas duras como carga de fondo. — Para trabajos subterráneos.
	Riogel VF	76	1,30	4.500	—	Excelente	— En forma vertible, como carga de fondo en voladuras de gran calibre y rocas con resistencias desde bajas a altas.
EMULSIONES	Riomex 1	62	1,25	4.800	—	Excelente	— Como carga de columna en voladuras a cielo abierto.
	Riomex 2	69	1,15	5.100	—	Excelente	— En voladuras de rocas de resistencia media a dura como carga de fondo.
	Riomex VF	72	1,35	4.200	—	Excelente	— En forma vertible, como carga de fondo en rocas de resistencia media a dura.

Fuente: Explosivos Rio Tinto, S. A.

**CLASIFICACION DE LAS ROCAS SEGUN SU FACILIDAD A LA FRAGMENTACION CON EXPLOSIVOS EN MINAS A CIELO ABIERTO**

CONSUMO ESPECIFICO DE EXPLOSIVO		DISTANCIA MEDIA ENTRE FACTURAS NATURALES EN EL MACIZO (m)	RESISTENCIA DE LA ROCA A COMPRESION SIMPLE (MPa)	DENSIDAD DE LA ROCA (t/m <sup>3</sup> )
LIMITES DE CLASES (kg/m <sup>3</sup> )	VALOR MEDIO (kg/m <sup>3</sup> )			
0.12-0.18	0.150	< 0.10	10-30	1.40-1.80
0.18-0.27	0.225	0.10-0.25	20-45	1.75-2.35
0.27-0.38	0.320	0.20-0.50	30-65	2.25-2.55
0.38-0.52	0.450	0.45-0.75	50-90	2.50-2.80
0.52-0.68	0.600	0.70-1.00	70-120	2.75-2.90
0.68-0.88	0.780	0.95-1.25	110-160	2.85-3.00
0.88-1.10	0.990	1.20-1.50	145-205	2.95-3.20
1.10-1.37	1.235	1.45-1.70	195-250	3.15-3.40
1.37-1.68	1.525	1.65-1.90	235-300	3.35-3.60
1.68-2.03	1.855	> 1.85	> 285	> 3.55

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LOS DETONADORES ERT	TIPO DE DETONADOR		
	S	I	AI
Resistencia de puente Ohmios ( $\Omega$ )	1,2-1,6	0,4-0,5	0,03-0,05
Impulso de encendido (mW. seg/ $\Omega$ )	0,8-3	8-16	1.100-2.500
Corriente de seguridad Amperios (A)	0,18	0,45	4
Corriente de encendido en series recomendada Amperios (A)	1,2	2,5	25

Fuente: Unión Explosivos Río Tinto, S. A.

#### VELOCIDADES SISMICAS DE DIFERENTES TIPOS DE ROCAS

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD SISMICA (m/s)
<b>IGNEAS</b> Granito Granito meteorizado Gabros Diabasas Basaltos	3.000 — 6.000 1.200 — 1.600 6.700 — 7.300 5.800 — 7.100 2.400 — 4.000
<b>SEDIMENTARIAS</b> Suelos normales Suelos consolidados Arenas sueltas Mezclas de grava y tierras sueltas Mezclas de grava y tierra consolidadas Arcillas Margas Areniscas Conglomerados Morrena glaciar Pizarras sedimentarias Calizas Dolomías	250 — 460 460 — 600 250 — 1.200 450 — 1.100 1.200 — 2.100 1.000 — 2.000 1.800 — 3.500 1.400 — 4.500 1.200 — 7.000 1.200 — 2.100 1.200 — 2.100 1.500 — 6.000 5.000 — 6.000
<b>METAMORFICAS</b> Gneis Gneis meteorizado Cuarцитas Pizarras metamórficas	3.000 — 6.000 1.200 — 1.600 5.000 — 6.000 1.800 — 3.000
<b>VARIOS</b> Sal Yeso Anhídrita Carbón Terrenos congelados Hielo Agua	4.500 — 6.500 3.000 — 4.000 3.000 — 6.000 900 — 1.500 1.200 — 2.100 3.000 — 3.700 1.500

**DENSIDADES APROXIMADAS DE DISTINTOS MATERIALES**

MATERIAL	Densidad suelo banco ( /m <sup>3</sup> )	Factor volumétrico de conversión	Porcentaje de expansión
BAUXITA	1.45 — 1.89	0.75	33%
ESCORIA	0.56 — 0.86	0.65	54%
CALIZA	1.54 — 2.61	0.59	70%
MINERAL DE URANIO	1.63 — 2.20	0.74	35%
ARCILLA:			
Estado natural	1.66 — 2.02	0.83	22%
Seca	1.48 — 1.84	0.81	25%
Húmeda	1.66 — 2.08	0.80	25%
ARCILLA Y GRAVA:			
Seca	1.42 — 1.66	0.86	17%
Húmeda	1.54 — 1.84	0.84	20%
CARBON:			
Antracitoso A bocamina	1.19 — 1.60	0.74	35%
Lavado	1.10 — 1.48	0.74	35%
Bituminoso A bocamina	0.95 — 1.28	0.74	35%
Lavado	0.83 — 1.13	0.74	35%
ROCA ALTERADA:			
75% Roca, 25% Tierra	1.96 — 2.79	0.70	43%
50% Roca, 50% Tierra	1.72 — 2.28	0.75	33%
25% Roca, 75% Tierra	1.57 — 1.06	0.80	25%
TIERRA:			
Seca	1.51 — 1.90	0.80	25%
Húmeda	1.60 — 2.02	0.79	26%
Barro	1.25 — 1.54	0.81	23%
GRANITO FRAGMENTADO	1.66 — 2.73	0.61	64%
GRAVA:			
Natural	1.93 — 2.17	0.89	13%
Seca	1.51 — 1.69	0.89	13%
Seca de 6 a 50 mm.	1.69 — 1.90	0.89	13%
Mojada de 6 a 50 mm.	2.02 — 2.26	0.89	13%
ARENA Y ARCILLA	1.60 — 2.02	0.79	26%
YESO FRAGMENTADO	1.81 — 3.17	0.57	75%
MINERALES DE HIERRO:			
Hematites	2.46 — 2.91	0.85	18%
Magnetita	2.79 — 3.28	0.85	18%
Pirita	2.58 — 3.03	0.85	18%
ARENISCA	1.51 — 2.52	0.60	67%
ARENA:			
Seca	1.42 — 1.60	0.89	13%
Húmeda	1.69 — 1.90	0.89	13%
Empapada	1.84 — 2.08	0.89	13%
TIERRA Y GRAVA:			
Seca	1.72 — 1.93	0.89	13%
Húmeda	2.02 — 2.23	0.91	10%
TIERRA VEGETAL	0.95 — 1.37	0.69	44%
TACONITAS	2.43 — 4.21 3.20 — 5.61	0.58 0.57	73% 75%
BASALTOS O DIABASAS FRAGMENTADAS	1.75 — 2.61	0.67	49%
NIEVE:			
Seca	0.13		
Húmeda	0.52		

Fuente: *Finanzauto, S. A.*