



GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS EN EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE VOLADURAS EN BANCO





DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA Y MINAS

SECRETARÍA DE ESTADO DE ENERGÍA

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

Y EL RETO DEMOGRÁFICO

GOBIERNO DE ESPAÑA



COLABORAN:

D. Javier Muñoz García, Director de Servicios de Formación de EPC Groupe



Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (LOM).



NIPO e: 084-17-001-7

La finalidad de esta Guía es su máxima utilización y difusión. No obstante, debe mencionarse explícitamente la Guía como fuente de cualquier información contenida en la misma que se utilice en acciones formativas, divulgativas o de otro tipo.

ÍNDICE

OBJETIVO Y ALCANCE	1
1. PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS CIVILES	2
1.1. Energía.....	2
1.2. Densidad.....	2
1.3. Velocidad de detonación.....	2
1.4. Diámetro crítico.....	2
1.5. Resistencia al agua	2
1.6. Sensibilidad	2
1.7. Estabilidad	4
1.8. Características de los humos.....	5
1.9. Balance de oxígeno	5
2. TIPOS DE EXPLOSIVOS	5
2.1. Dinamitas gelatinosas	5
2.2. Geles.....	6
2.3. Emulsiones	6
2.4. Anfo.....	7
2.5. Mezclas a granules de Emulsión – ANFO	8
3. TIPOS DE DETONADORES	9
3.1. Detonadores eléctricos	9
3.2. Detonador no eléctrico	11
3.3. Detonador electrónico	13
4. ACCESORIOS DE VOLADURA.....	13
4.1. Cordón detonante	13
4.2. Multiplicadores (Boosters).....	14



5.	EFFECTO DE LA INICIACIÓN EN LOS EXPLOSIVOS.....	15
6.	INICIACIÓN DEL BARRENO.....	15
6.1.	Iniciación en superficie.....	16
6.2.	Iniciación en fondo.....	17
6.3.	Sistemas híbridos	19
7.	CONEXIÓN DE LA VOLADURA Y COMPROBACIONES EN EL CIRCUITO	19
7.1.	Pegas eléctricas	19
7.1.1.	Comprobación de la resistencia del circuito	20
7.2.	Circuitos de detonadores electrónicos	20
7.3.	Pegas no eléctricas	21
8.	CONDICIONANTES AL DISEÑO DE VOLADURAS EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO.....	23
8.1.	Potencia y morfología del yacimiento.....	23
8.2.	Dureza de la roca.....	23
8.3.	Presencia de juntas y planos de estratificación	23
8.4.	Tamaño de la operación.....	24
8.5.	Forma de pila de escombros.....	24
8.6.	Nivel de fragmentación	25
8.7.	Tipo de maquinaria de perforación.....	25
8.8.	Cantidad de agua en los barrenos.....	26
8.9.	Integridad de los barrenos	26
8.10.	Proximidad a estructuras sensibles, zonas habitadas y restricciones legales.....	26
9.	SUPERVISIÓN DEL FRENTE Y DE LOS BARRENOS.....	27
9.1.	Supervisión del frente	27
9.2.	Supervisión de los barrenos	28
9.3.	Metodología de trabajo	29
9.3.1.	Metodología correctiva	29



9.3.2.	Metodología predictiva	29
10.	MECANISMO DE ROTURA DE LA ROCA	30
10.1.	Energía de choque.....	30
10.2.	Energía de gases.....	31
11.	FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO DEL EXPLOSIVO.....	31
11.1.	Grado de acoplamiento.....	31
11.2.	Carga lineal.....	31
11.3.	Impedancia característica	32
11.4.	Diámetro de carga.....	32
12.	DISEÑO DE LA VOLADURA.....	32
12.1.	Geometría de la voladura.....	32
12.2.	Altura de banco	32
12.3.	Diametro de perforación.....	33
12.4.	Piedra (B).....	33
12.5.	Espaciamiento (S).....	34
12.6.	Esquema de perforación	34
12.7.	Inclinación del barreno.....	34
12.8.	Sobreperforación	34
12.9.	Longitud del barreno.....	35
12.10.	Carga de fondo	35
12.11.	Retacado.....	35
12.12.	Carga de columna.....	35
12.13.	Uso de mezclas a granel emulsión/anfo	36
12.14.	Método de detonación.....	36
12.15.	Posición del cebo.....	36
12.16.	Secuencia de disparo. Carga operante (MIC).....	37



12.17.	Dirección de la voladura.....	37
12.18.	Selección de la secuencia de disparo	37
12.19.	Piedras excesivas o reducidas	38
12.20.	Consumo específico	40
12.21.	Retacados intermedios para reducir las vibraciones	40
13.	TAQUEO DE BLOQUES.....	40
14.	FRENTE ESTABLE TRAS LA VOLADURA	42
15.	VOLADURAS DE CONTORNO	42
15.1.	Perforación de barrenos vacíos.....	43
15.2.	Precorte.....	43
16.	PREVENCIÓN DE PROYECCIONES	44
16.1.	Errores en la perforación	44
16.2.	Problemas durante la carga	45
17.	ESPECIFICACIÓN DE VOLADURA.....	46
17.1.	Contenidos de la especificación de voladura.....	47
17.1.1.	Plano de la explotación	47
17.1.2.	Esquema de perforación	47
17.1.3.	Perfiles de los barrenos adyacentes o cualquier cara libre.....	48
17.1.4.	Anomalías geológicas que puedan afectar a la seguridad	48
17.1.5.	Plan de carga de cada barreno.....	49
17.1.6.	Parte de carga real	49
17.1.7.	Sistemas de iniciación	49
17.1.8.	Condiciones de visibilidad	50
17.1.9.	Condiciones del disparo	50
17.1.10.	Condiciones de visibilidad	50
18.	CARGA Y DISPARO DE LA VOLADURA.....	50



18.1.	Carga con explosivo convencional	50
18.2.	Carga con mezcla a granel de ANFO/EMULSIÓN	51
19.	BARRENOS FALLIDOS.....	52
19.1.	Fallo total en la iniciación de la pega	52
19.2.	Fallo parcial. Barrenos fallidos	53
20.	Destrucción del explosivo sobrante	55
21.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA VOLADURA.....	58
21.1.	Onda aérea	60
22.	CERTIFICACIÓN Y HOMOLOGACIÓN DE EQUIPOS.....	60
22.1.	Certificado de examen de tipo	60
22.2.	Homologación	60
22.2.1.	Control de fabricación de productos.....	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	

FIGURAS

<i>Figura 1: Componentes de un explosivo.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2: Ejemplo de la variación de la densidad de una emulsión (g/cm³) con la profundidad del barreno.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 3: Medición de la velocidad de detonación de una mezcla a granel de emulsión - anfo de un barreno de 92 mm.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 4: Relación entre el diámetro de carga y la VOD.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 5: Ensayo al aire de un explosivo altamente sensible (dinamita).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 6: Ensayo al aire de un explosivo de sensibilidad reducida (gel).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 7: Cartuchos de explosivo en un estado evidente de degradación.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 8: Humos de color naranja tras el disparo de una voladura, característicos de una detonación incompleta.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 9: Dynamita encartuchada de calibre mediano.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 10: Carga de un cartucho de gel en un barreno.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 11: Aspecto de prill de nitrato amónico usado en la fabricación de ANFO.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 12: Esquema de una MEMU.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 13: Esquema de un detonador eléctrico.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 14: Esquema de un detonador no eléctrico.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 15: Sección de un tubo de choque.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 16: conectores de superficie y detonadores de fondo no eléctricos.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 17: Detonador electrónico.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 18: Posibles uniones de cordón detonante.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 19: Booster de TNT.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 20: Columna de explosivo de un barreno fallido.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 21: Esquema de iniciación en superficie.....</i>	<i>16</i>



Figura 22: Barrenos iniciados en superficie. Se aprecia el efecto negativo de la rotura del retacado 17

Figura 23: Preparación de un booster de cebo con dos detonadores 18

Figura 24: Esquema de iniciación en fondo de barreno 18

Figura 25: Posible esquema híbrido de iniciación de un barreno haciendo uso de cordón y cebos 19

Figura 26: Secuencia en superficie con detonadores eléctricos 20

Figura 27: Ejemplo de cálculo de la resistencia de un circuito en serie..... 20

Figura 28: Conexión de detonadores electrónicos a la línea 21

Figura 29: Secuencia de pega no eléctrica con dos detonador por barreno (475 ms/500 ms) y conectores de 25 ms en superficie..... 22

Figura 30: Conexión correcta 22

Figura 31: Marcado con espray de una conexión verificada..... 22

Figura 32: Conexiones enterradas en 20 cm de tierra o material de retacado 23

Figura 33: Tipos de condicionantes a un diseño de voladura..... 23

Figura 34: Condiciones geotécnicas muy complejas que impiden una fragmentación homogénea 23

Figura 35: Presencia de planos horizontales de estratificación separando zonas de dureza variable..... 24

Figura 36: Consideraciones sobre la forma requerida de la pila de material en función de la maquinaria disponible..... 24

Figura 37: Carros de perforación de martillo en fondo 26

Figura 38: Modelo tridimensional de un frente de voladura 27

Figura 39: Errores en el ángulo de perforación. Variación de la distancia real a la cara libre ... 28

Figura 40: Influencia del azimut en el espaciamiento entre barrenos 28

Figura 41: Perfil de una perforación real, obtenida mediante sonda electrónica.....29

Figura 42: Vista real de una perforación en banco, obtenida mediante láser 3D y sonda de medición de barrenos..... 29

<i>Figura 43: Metodología correctiva</i>	29
<i>Figura 44: Replanteamiento de la posición del barreno para adaptarse a la piedra de diseño</i> .	30
<i>Figura 45: Esquema de generación de un tren de ondas de compresión alrededor del barreno</i>	30
<i>Figura 46: Reflexión de las ondas en la cara libre del frente del banco</i>	31
<i>Figura 47: Expansión de los gases de detonación y proyección de la roca</i>	31
<i>Figura 48: Esquema de los parámetros geométricos de diseño de una voladura en banco</i>	32
<i>Figura 49: Consecuencias posibles de piedras incorrectas en la voladura</i>	34
<i>Figura 50: Tabla de selección del parámetro de diseño de la piedra en función del diámetro de perforación y la dureza del material</i>	34
<i>Figura 51: Aprovechamiento de la energía del explosivo en barrenos inclinados</i>	34
<i>Figura 52: Disposición de carga y secuenciación en barrenos con cargas partidas</i>	37
<i>Figura 53: Dirección de la salida de la voladura mediante secuenciación de los barrenos</i>	37
<i>Figura 54: Selección de una secuencia de disparo que reduce el riesgo de consecuencias de un corte</i>	38
<i>Figura 55: Uso de un retacado intermedio para evitar una piedra reducida en el perfil del banco</i>	39
<i>Figura 56: Esquema de secuenciación de una pega con cargas partidas, usando detonadores en fondo (475/500) y conectores en superficie de 42 ms</i>	40
<i>Figura 57: Taqueo de un bloque mediano mediante el disparo de un barreno en élbarrenos de poco diámetro.</i>	41
<i>Figura 58: Taqueo de un bloque mediante un parche adosado al mismo</i>	41
<i>Figura 59: Talud final tras una pega de precorte</i>	43
<i>Figura 60: Barrenos vacíos</i>	43
<i>Figura 61: Esquema de precorte</i>	43
<i>Figura 62: Carga de barrenos de precorte con cordón detonante</i>	44
<i>Figura 63: Proyecciones en una voladura en banco</i>	44
<i>Figura 64: errores de perforación que pueden degenerar en proyecciones peligrosas de material</i>	45



<i>Figura 65: Proyecciones generadas por el disparo de un barreno corto en el pie del banco</i>	<i>45</i>
<i>Figura 66: Conjunto de acciones orientadas a la seguridad de la voladura</i>	<i>47</i>
<i>Figura 67: Plano de la explotación con los elementos principales de acceso y zona de peligro .</i>	<i>47</i>
<i>Figura 68: Barreno numerado con spray y conexión verificada</i>	<i>48</i>
<i>Figura 69: Esquema de la perforación.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 70: Perfil de un barreno obtenido a partir de un láser 3D y sonda de medición de barrenos</i>	<i>48</i>
<i>Figura 71: Ejemplo de un parte de perforación reportando cavidades en dos barrenos.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 72: Ejemplo de una anomalía en el frente, reportada sobre una foto del mismo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 73: Ejemplo de un diagrama de carga</i>	<i>49</i>
<i>Figura 74: Ejemplo de un esquema de conexión</i>	<i>50</i>
<i>Figura 75: Refugio adecuado para el disparo de una voladura</i>	<i>52</i>
<i>Figura 76: Falta de movimiento que indica la presencia de barrenos fallidos</i>	<i>53</i>
<i>Figura 77: Esquema de perforación de un barreno paralelo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 78: Efectos ambientales de las voladuras</i>	<i>58</i>
<i>Figura 79: Velocidad de vibración norma UNE 22.381-93</i>	<i>58</i>
<i>Figura 80: Disposición de sismógrafos en el estudio de una zona de voladuras.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 81: Cargas partidas en un barreno para reducir la carga operante (MIC).....</i>	<i>59</i>



OBJETIVO Y ALCANCE

Durante las últimas décadas, la extracción de roca mediante perforación y voladura ha evolucionado de forma progresiva desde una actividad casi artesanal; llevada a cabo por trabajadores con muy poca supervisión técnica directa, hasta una operación sofisticada que depende de manera fundamental de parámetros como las restricciones ambientales, las condiciones geológicas, la maquinaria de perforación y excavación o el producto explosivo disponible. El correcto diseño de voladuras pone en juego una serie de factores diferentes con el objetivo de conseguir unas condiciones seguras de trabajo, una fragmentación óptima y un coste aceptable.

La presente guía expone una metodología o serie de medidas prácticas de sencilla implementación, tanto en la fase de diseño como durante la fase de carga y disparo de la voladura. Estas medidas están enfocadas primeramente a asegurar la seguridad de todas las operaciones relacionadas con una correcta voladura; lo cual incluye también la influencia que ésta tiene en las posteriores labores de carga, transporte y saneamiento del frente. Sin olvidar en ningún momento que la finalidad de cualquier voladura es conseguir un resultado óptimo de fragmentación y empuje al coste global más razonable.

1. PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS CIVILES

Los explosivos civiles para voladura son una mezcla íntima de ciertas sustancias, explosivas o no. Unas son combustibles (fuel, aceite o ceras), otras son oxidantes (nitrato amónico) y otras actúan como sensibilizantes (NG, burbujas de nitrógeno); rebajando la energía de activación de la reacción y aportando puntos calientes que permiten su progresión a lo largo de la columna de explosivo. La reacción de detonación se produce normalmente a regímenes de 4000 m/s – 6000 m/s en los diámetros de perforación más habituales en cantera. Liberan su energía en un tiempo ínfimo por lo que proporcionan una gran potencia de trabajo.

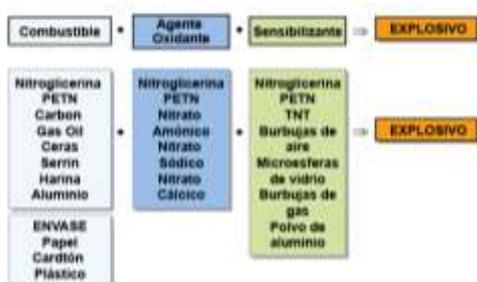


Figura 1: Componentes de un explosivo

Es fundamental que las características del explosivo sean compatibles con las condiciones en las que se va a llevar a cabo la voladura y es por ese motivo que los fabricantes disponen de un amplio catálogo de productos que cubre cualquier necesidad. Cada tipo de explosivo posee su lista de características que lo hacen más o menos adecuado en cada operación.

1.1 ENERGÍA

Es una medida de la capacidad del explosivo para realizar trabajo útil (fragmentar y

desplazar el material); se refiere al contenido energético del explosivo. Esta energía total, expresada en MJ/kg, se divide en dos tipos: una energía de choque que fractura fuertemente la roca y una energía de gases que fragmenta más el material y lo proyecta.

La energía de un explosivo se suele mostrar como porcentaje de un explosivo patrón, para ello se emplea generalmente el ANFO. De esta manera se obtiene la energía relativa al ANFO tanto en peso (RWS) como en volumen (RBS), siendo esta última la más importante a la hora de realizar cálculos y comparaciones de energía en una voladura. Dado que el valor de RBS depende de la densidad, este valor puede variar a lo largo de la longitud de un barreno en banco, siendo mayor en el fondo. Este efecto, que se debe a la presión hidrostática de la columna de explosivo y al agua que pueda existir en el barreno, es pronunciado cuando se emplean explosivos sensibilizados con gas.

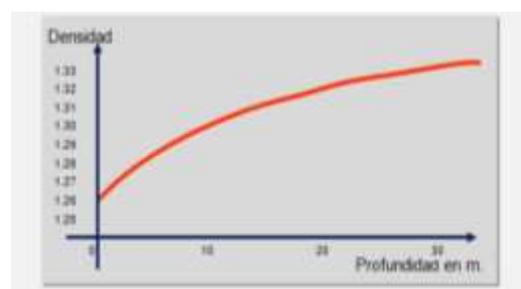


Figura 2: Ejemplo de la variación de la densidad de una emulsión (g/cm^3) con la profundidad del barreno

1.2 DENSIDAD

Además de afectar al valor de la energía relativa en volumen RBS, es de importancia en otra serie de cuestiones como la capacidad de cargar barrenos con agua, la

sensibilidad del explosivo o la velocidad de detonación.

1.3 VELOCIDAD DE DETONACIÓN

Mide la velocidad de reacción de detonación en m/s. Es una medida de la capacidad rompedora del explosivo (a mayor velocidad de detonación, mayor poder rompedor y mayor capacidad de fragmentación); depende fundamentalmente de la formulación del explosivo, el grado de confinamiento, el diámetro de carga y el tipo de iniciación. La presión de detonación se puede calcular a partir de la velocidad de detonación y la densidad del explosivo y es una característica importante a la hora de elegir un tipo de iniciador u otro. Tanto la velocidad de detonación como la presión de detonación se pueden medir directamente en el barreno en condiciones reales de voladura.

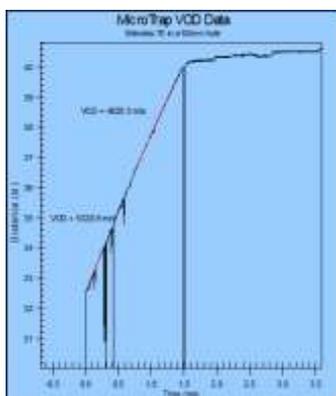


Figura 3: Medición de la velocidad de detonación de una mezcla a granel de emulsión - anfo de un barreno de 92 mm

1.4 DIÁMETRO CRÍTICO

Es el diámetro de carga por debajo del cual la detonación no es capaz de progresar. Parámetro a tener en cuenta de manera especial si se perforan barrenos de un diámetro reducido. Las hojas técnicas del

fabricante suelen indicar este valor, en condiciones normales de presión y temperatura, así como otras recomendaciones de uso. En caso de duda, se deberá contactar con el servicio técnico del proveedor.



Figura 4: Relación entre el diámetro de carga y la VOD

1.5 RESISTENCIA AL AGUA

Es muy frecuente encontrarse con barrenos que están inundados en mayor o menor medida. En ese caso, el uso de un explosivo que se deteriora en el agua (por ejemplo, el ANFO) no es posible y es necesario recurrir a explosivos resistentes al agua hasta secar y sellar el barreno. Cabe mencionar que, en función de la cantidad de agua y el caudal de infiltración en el barreno, existen técnicas de desagüe y carga que pueden permitir el uso de anfo en ciertas condiciones.

1.6 SENSIBILIDAD

Es una medida de la facilidad de iniciación que tiene un explosivo para ser iniciado correctamente. En la práctica se definen dos niveles de sensibilidad:

- Sensible al detonador (Nº 8 de potencia).
- Sensible al booster / cartucho cebo.



Las condiciones existentes de presión y temperatura afectan directamente a esta propiedad. De este modo, una temperatura demasiado baja reduce la sensibilidad del explosivo y puede llegar a dejarlo totalmente inerte. Igualmente, cualquier explosivo puede quedar inutilizado si es sometido a una presión demasiado alta.

Cualquier explosivo puede llegar a detonar de manera accidental si es sometido a temperaturas demasiado elevadas. Esto puede ser problemático en ciertos yacimientos metálicos con barrenos calientes.

Las hojas técnicas de cada producto especifican las condiciones normales de uso de presión y de temperatura. En caso de duda, en una aplicación atípica concreta, es necesario consultar con el servicio técnico del proveedor.

En el diseño y carga de voladuras en banco la sensibilidad del explosivo es una característica muy a tener en cuenta ya que puede degenerar en cortes y fallos en la voladura. Por ello, antes de someter a un explosivo a condiciones exigentes (temperaturas muy bajas o barrenos de gran profundidad, por ejemplo), hay que estar completamente seguro de que la energía de iniciación que va a recibir es la adecuada.

Los explosivos sensibilizados con burbujas de gas (hidrogeles y emulsiones) son más propensos a sufrir el fenómeno de desensibilización por presión y puede ser causado por varios factores:

- Desensibilización por choque o muerte por presión dinámica. Se refiere a la onda de choque generada por la detonación previa de un barreno adyacente. Esta puede llegar a comprimir la carga de explosivo en mayor

o menor grado hasta inutilizarla por completo.

- Desensibilización por gases. Los gases de la detonación previa de un barreno adyacente pueden colarse entre las grietas del terreno fracturado hasta alcanzar la carga explosiva y someterla a una presión demasiado elevada, reduciendo en mayor o menor medida su sensibilidad. La presencia de agua en el terreno mayoría el riesgo.
- Muerte por presión estática. La presión hidrostática, de la propia columna de explosivo y del agua existente en el barreno, puede someter al explosivo situado en el fondo a presiones demasiado elevadas que lleguen a dificultar o impedir su iniciación. Esto es un factor a tener en cuenta en barrenos de una cierta longitud, por ello, las emulsiones, tanto encartuchadas como a granel, tienen formulaciones especiales sensibilizadas con microesferas de vidrio que pueden aumentar más de 30 veces su resistencia a este fenómeno.

Los tres casos anteriores se pueden mitigar mediante el empleo de un iniciador de mayor potencia, por ejemplo, iniciando con booster de TNT en lugar de detonador.

- Detonación por simpatía. En terrenos muy fracturados o con errores importantes de perforación, la onda de choque de un barreno adyacente puede detonar la carga. Esto podría llegar a ocurrir con ciertos explosivos muy sensibles, como dinamitas con alto porcentaje de NG (nitroglicerina / nitroglicol). Es un fenómeno más habitual en la zona del cuele en pegas de avance en galería.
- Efecto canal. Es una situación especial en la cual los gases de detonación que viajan entre el cartucho y las paredes del barreno a gran velocidad llegan a comprimir en exceso el explosivo aún sin detonar. Es más común en voladuras de avance en galería cuando existen diferencias importantes entre los

diámetros de cartucho y de barreno. Dinamitas, emulsiones e hidrogeles son todos propensos a este fenómeno.



Figura 5: Ensayo al aire de un explosivo altamente sensible (dinamita)

Una sensibilidad alta del explosivo puede degenerar en situaciones de alto riesgo. Un explosivo tipo dinamita, sensibilizado con NG, es menos propenso a fallar por falta de sensibilidad durante la voladura. Sin embargo, las condiciones geológicas del terreno son un factor difícilmente controlable y son la fuente más frecuente de fallos. Por ejemplo, el movimiento de bloques durante la pega que provoca el corte accidental de barrenos o vetas de arcilla en el barreno que provocan una pérdida en la continuidad durante la carga.

Estos fallos pueden ser puntuales en una voladura, sin llegar a originar por ello un fallo llamativo de la misma, pasando por tanto inadvertidos durante la inspección tras la pega. En este caso, la pila de escombros de voladura podrá contener inesperados cartuchos sin detonar. Cuando estos cartuchos son de dinamita, el riesgo al que nos exponemos es muy alto debido a su contenido en NG.

Esta situación entraña un riesgo muy elevado para los operadores de las máquinas de carga al ser éste un explosivo sensibilizado con NG que puede detonar

fácilmente al sufrir el impacto del cazo de una máquina cargadora.



Figura 6: Ensayo al aire de un explosivo de sensibilidad reducida (gel)

Si el cartucho lograra pasar de la pala cargadora sin detonar, el siguiente punto de posible detonación accidental sería la machacadora primaria.

Por el contrario, los explosivos tipo emulsión tienen una sensibilidad muy reducida al impacto, siendo muy seguros en su manipulación y garantizando una mayor seguridad en caso de barrenos fallidos.

1.7 ESTABILIDAD

Es la capacidad de un explosivo de mantener sus propiedades con el paso del tiempo. Cada explosivo especifica en su hoja técnica de producto su vida útil en condiciones normales de almacenamiento. El almacenamiento correcto es determinante a la hora de garantizar las propiedades de un explosivo en el tiempo. En condiciones óptimas, un explosivo se puede llegar a consumir sin riesgo de fallo más allá de su fecha teórica de caducidad. Sin embargo, no se deben consumir nunca productos que estén pasados de fecha de caducidad sin haber realizado una consulta al fabricante y este los haya inspeccionado debidamente. Del mismo modo, un almacenamiento en condiciones deficientes

puede hacer que un producto se eche a perder mucho antes de su fecha teórica de caducidad. En caso de sospecha sobre el estado del producto y su seguridad de manipulación, se debe acudir al fabricante para que inspeccione el producto y aconseje qué hacer con el mismo.



Figura 7: Cartuchos de explosivo en un estado evidente de degradación

1.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMOS

Durante la detonación se liberan una serie de gases tóxicos como CO y NOx. La cantidad de estos gases determina la calidad de los humos de voladura. No todos los explosivos liberan la misma cantidad de gases tóxicos por unidad de masa. Esta es una propiedad muy importante en operaciones de interior; pero se ha de tener en cuenta también en operaciones a cielo abierto que puedan estar en zonas confinadas con poca circulación de aire. En cualquier caso, nunca se debe acceder a la zona de voladura hasta que la nube de humo y polvo se haya disipado por completo.



Figura 8: Humos de color naranja tras el disparo de una voladura, característicos de una detonación incompleta

1.9 BALANCE DE OXÍGENO

Para que la detonación se lleve a cabo de manera completa, el combustible presente en el explosivo debe ser el necesario para consumir exactamente todo el oxígeno disponible en la formulación. En este caso, el balance de oxígeno es cero.

Si existe un exceso de oxígeno, se producen humos de color marrón, característicos de emisiones de óxidos de nitrógeno. Si existe un exceso de combustible, se producirá más CO. El envoltorio de los cartuchos se considera combustible en la mezcla.

2. TIPOS DE EXPLOSIVOS

En el mercado español existen diferentes tipos de explosivos para su uso en canteras y minas a cielo abierto.

2.1 DINAMITAS GELATINOSAS

Son explosivos con un contenido de NG de en torno al 30% - 40%, en función de la formulación y una densidad que varía entre 1,40 g/cm³ - 1,55 g/cm³. Se comercializan encartuchados en film de plástico o en papel parafinado.

Son un iniciador muy potente para explosivos tipo ANFO y emulsiones. Se emplean además como carga de fondo de barreno, donde trabajan de manera muy eficiente en todo tipo de rocas, especialmente en rocas masivas de gran dureza.

Las formulaciones actuales son muy seguras en su manipulación, pero su alto contenido en NG puede provocar fuertes dolores de cabeza ya que es un vasodilatador que se absorbe por vía respiratoria y cutánea.

Son explosivos sensibilizados con NG y que detonan si se someten a un fuerte impacto mecánico. Este es su gran inconveniente de seguridad, ya que pueden provocar accidentes durante las tareas de carga de material si en la pila de escombros existen cartuchos sin detonar.



Figura 9: Dinamita encartuchada de calibre mediano

2.2 GELES

Son una suspensión saturada de nitrato amónico y otras sales, mezcladas con combustibles y agentes espesantes como la goma guar. La mezcla es resistente al agua sólo cuando está debidamente reticulada. No contienen sustancias explosivas en su formulación.

Se comercializan encartuchados y se encuentran disponibles en diferentes grados de energías. Sus usos pueden ser varios: cebo para ANFO, carga de fondo en barrenos de rocas de dureza media - baja y carga de columna de barrenos con agua.



Figura 10: Carga de un cartucho de gel en un barreno

Su densidad varía entre $1,20 \text{ g/cm}^3$ y $1,25 \text{ g/cm}^3$. Están sensibilizados con burbujas de gas por lo que son propensos a sufrir muerte por presión en determinadas circunstancias.

2.3 EMULSIONES

Una emulsión explosiva es una emulsión tipo agua en aceite, donde la fase dispersa es una solución acuosa de nitrato amónico y la fase continua es una mezcla oleosa de aceites y ceras (una proporción elevada de éstas confieren una reología más dura y consistente). Las fases se encuentran estabilizadas por un agente emulsionante y la mezcla es resistente al agua de por sí.

Al igual que los hidrogeles, su formulación no contiene sustancias explosivas.

Se dispone de una amplia variedad de formulaciones para adaptarse a prácticamente a cualquier necesidad de uso. De esta manera, aumentando el contenido de aluminio se mejora el calor de explosión, existiendo en la actualidad



formulaciones que superan en RBS a la mayoría de dinamitas.

Su densidad varía entre 1,20 g/cm³ y 1,30 g/cm³ y tienen una velocidad de detonación elevada. Se pueden usar como cartucho cebo de explosivos tipo ANFO y sobre todo como carga de fondo para rocas de cualquier dureza en su versión más energética o como carga de columna de barrenos con agua en formulaciones con contenidos más reducidos de Al.

Suelen estar sensibilizadas con burbujas de gas por lo que son propensas a sufrir problemas de muerte por presión bajo ciertas condiciones. Existen formulaciones sensibilizadas con microesferas de vidrio que permiten su carga en barrenos de gran longitud.

La mayoría de formulaciones de emulsiones y geles encartuchados son sensibles a los detonadores. Sin embargo, con el objeto de asegurar una iniciación de calidad óptima, se recomienda iniciarlos con un cebo de mayor potencia como puede ser por ejemplo un cartucho de dinamita o un multiplicador de TNT. Esto es de especial relevancia en barrenos que pasan de una cierta profundidad (15 metros).

2.4 ANFO

Se trata de una mezcla de nitrato amónico poroso (absorbente) con gasoil (en torno al 5,5% en peso). Se puede suministrar en formato encartuchado para ciertas aplicaciones, pero es un producto que se carga normalmente a granel (en sacos de 15kg / 25kg o por gravedad desde camión) y ocupa el volumen de barreno en su totalidad. Esto tiene la ventaja de producir un acoplamiento máximo con el barreno y se aprovecha al máximo su energía. El

inconveniente es que puede rellenar grietas y cavidades, generando un riesgo potencial de proyecciones. Por este motivo, la subida del explosivo en el barreno durante la carga se ha de medir con regularidad, especialmente si existen problemas de grietas en la perforación.

Debido a la solubilidad del nitrato amónico, el anfo no resiste al agua por lo que su uso se limita a barrenos secos. El anfo tiene una densidad inferior al agua, en torno 0,8 g/cm³, por ello los cartuchos flotan en agua y no se pueden cargar con seguridad en barrenos inundados.

Existen algunas formulaciones de anfo que incorporan aluminio para mejorar su calor de explosión y otras que incorporan goma guar para darle una cierta resistencia al agua en barrenos con algo de humedad.

Su uso fundamental es como carga de columna en barrenos secos o previamente desaguados. Es un explosivo que trabaja muy bien en materiales de cualquier dureza siempre que exista una cierta fragmentación natural (estratificación, diaclasado, etc.) Se obtienen de manera general una muy buena fragmentación y alto grado de esponjamiento de la pila de material.

Se puede cargar también mediante equipos de aire comprimido (esto es más frecuente en operaciones de interior) aumentando su densidad en el barreno hasta prácticamente 1,0 g/cm³ y mejorando su eficiencia de manera considerable.



Figura 11: Aspecto de prill de nitrato amónico usado en la fabricación de ANFO

2.5 MEZCLAS A GRANEL DE EMULSIÓN – ANFO

Hoy en día la gran mayoría de las voladuras en el mundo se cargan con este tipo de mezclas que se fabrican in situ, en la mina o cantera, gracias a una unidad de fabricación y carga, generalmente montada sobre un chasis de camión. Estas unidades reciben el nombre de MEMU.

Las MEMUs (unidades móviles de fabricación de explosivos), son unidades o vehículos equipados con una unidad para la fabricación y carga de explosivos; a partir de mercancías peligrosas que no son explosivas. La unidad está compuesta por diferentes cisternas y contenedores para granel y por el equipamiento para el mezclado; así como bombas y sus accesorios. Las MEMUs pueden incluir también compartimentos para el transporte de explosivos embalados 1.1.

Los modelos más completos de MEMU pueden fabricar mezclas en cualquier proporción de Emulsión / ANFO, desde ANFO puro a emulsión pura. Las mezclas más frecuentes son:

- ANFO puro: se descarga por gravedad en el barreno. Sólo para barrenos secos.

- 70% ANFO / 30% emulsión. Esto es un heavy ANFO. No es bombeable y se descarga por gravedad en el barreno. La emulsión se añade en forma de matriz, sin sensibilizar, a una densidad aproximada de $1,40 \text{ g/cm}^3$. Esta rellena los huecos entre prills de ANFO, aumentando su densidad final hasta el entorno de $1,1 \text{ g/cm}^3$ y, aunque la emulsión también le confiere cierta resistencia al agua, no se puede cargar en barrenos inundados si no se han desaguado previamente.

- 20% ANFO / 80% emulsión. Esto es una emulsión dopada. Es bombeable y se carga mediante manguera de diámetro interior menor que el diámetro crítico del explosivo fabricado. Es resistente al agua por completo.

Siempre se debe bombear desde el fondo del barreno, desplazando el agua presente en el barreno hacia el exterior y recogiendo la manguera poco a poco.

Cargar la mezcla desde la boca del barreno por gravedad es una mala práctica y recientes ensayos muestran que puede provocar fallos de discontinuidad en la columna por muy poca agua que tenga el barreno.

La emulsión necesita ser sensibilizada in situ, generalmente mediante una disolución de nitrito sódico. La mezcla bombeada en el barreno no es explosiva hasta pasados unos minutos; por ello, este tipo de mezclas no se pueden retacar de inmediato, necesitan un cierto tiempo, del orden de 10 a 15 minutos, para terminar de expandirse dentro del barreno. Existen MEMUs que sensibilizan con microesferas de vidrio o con bolas de poliestireno expandido e incluso añaden aluminio a la mezcla final para incrementar el calor de explosión.

La última generación de MEMUs permite la gasificación variable de estas mezclas

dentro del barreno, fabricando mezclas de alta densidad en el fondo y mezclas muy ligeras, cercanas a $0,7 \text{ g/cm}^3$ en la zona próxima al retacado.

Todas estas mezclas son exclusivamente sensibles al booster y, por cargarse a granel, ocupan por completo el volumen del barreno, mejorando así el rendimiento obtenido de la perforación. Tienen el inconveniente de rellenar grietas y cavidades en el barreno. Por este motivo, para evitar riesgos de proyección, la carga en el barreno se debe verificar regularmente.

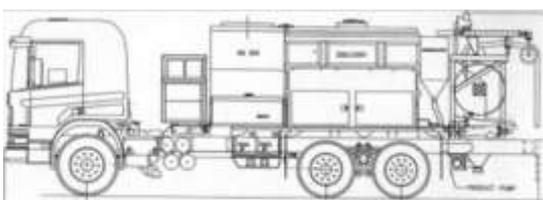


Figura 12: Esquema de una MEMU

3. TIPOS DE DETONADORES

Los diferentes sistemas de iniciación, conocidos como detonadores, pueden emplearse tanto en voladuras a cielo abierto como en interior y su finalidad es la de iniciar el cartucho cebo o multiplicador que desencadene la detonación en el interior del barreno.

La elección de un tipo de detonador u otro vendrá determinada por las necesidades de secuenciación, características del entorno, complejidad de las conexiones y la economía de la voladura, entre otros factores.

3.1 DETONADORES ELÉCTRICOS

Se componen de un circuito eléctrico en el que una resistencia se calienta por efecto Joule hasta inflamar una cerilla pirotécnica que es la que desencadena el resto de la reacción.

A continuación, esta cerilla enciende un elemento de retardo que, en función de su longitud y composición, proporciona un cierto tiempo nominal. Si el detonador carece de este elemento de retardo, entonces es un detonador instantáneo de tiempo "0".

Después de este elemento hay una carga primaria de explosivo (Azida de Pb) y una carga base de PETN (de unos 0,8g).

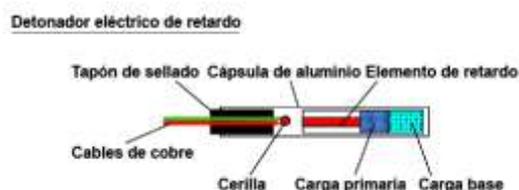


Figura 13: Esquema de un detonador eléctrico

El conjunto está contenido en una cápsula de aluminio (o de cobre en detonadores de seguridad, para minería de interior de carbón) sellada en su extremo inferior y con unos hilos de cobre aislados de una cierta longitud para permitir la conexión con otros detonadores o una línea de tiro.

Los detonadores llevan un código de colores en sus hilos para diferenciarlos fácilmente en función de su grado de sensibilidad y su tipo de retardo (micro o retardo largo).

Este tipo de detonador ha caído progresivamente en desuso con la entrada del sistema no eléctrico. Presenta como ventaja la posibilidad de verificar el circuito de voladura antes de la pega. Sin embargo, sus desventajas operativas son importantes:



- Las conexiones son más laboriosas y precisan de más tiempo y atención.
- La precisión de tiempos es aceptable; aunque presenta mucha dispersión, especialmente en tiempos largos, insuficiente para ciertas aplicaciones.
- La disponibilidad de retardos es muy limitada. Las series de micros suelen tener unos 20 números, por ejemplo.
- Por ser un sistema eléctrico, son susceptibles a una iniciación prematura debida a corrientes inducidas en el circuito (radiofrecuencia, líneas de alta tensión), tormentas, energía estática (la propia almacenada en el cuerpo humano, por ejemplo), corrientes inducidas en el terreno o corrientes galvánicas. Para hacer frente a este problema, se suministran también en versión Altamente Insensible (A.I.); estos detonadores tienen una resistencia eléctrica menor en el puente, lo cual hace necesaria una mayor intensidad de corriente para alcanzar la temperatura de encendido de la cerilla.

La utilización de este tipo de detonadores debe seguir escrupulosamente lo establecido por las normas de seguridad minera en cuanto a proximidad a líneas eléctricas, estaciones transformadoras y radio-frecuencia en emisión. Además, como recomendaciones generales:

- Se deben conocer de antemano las características de los detonadores, tales como resistencia total del detonador (resistencia de hilos + resistencia del puente), Intensidad de corriente recomendada, Impulso de encendido, etc.
- Se debe conocer la resistencia de la línea de disparo y verificarla antes de cada pega. La línea de disparo volante se debe desechar después de cada voladura.
- Los elementos de comprobación y disparo deben estar homologados por el Ministerio

de Energía, Turismo y Agenda Digital y encontrarse en perfecto estado (se recomienda una revisión periódica de los mismos, máximo cada 6 meses).

- Solo se pueden disparar con explosores homologados por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital; nunca con baterías u otros sistemas. Además, el explosor seleccionado debe ser de capacidad suficiente para proporcionar la corriente de encendido a todos los detonadores del circuito.
- No se pueden mezclar nunca detonadores de diferente grado de sensibilidad o de diferentes fabricantes.
- Las conexiones entre detonadores deben ser siempre en serie, salvo que se tenga un permiso especial de la autoridad minera competente para realizar conexiones en paralelo (más complejas).
- No es recomendable incluir el detonador número "0", instantáneo, en la pega. Cuando detona el primer detonador da la serie se rompe el circuito. Al detonar el número "0" puede provocar la rotura del circuito antes de que todos los detonadores hayan recibido el impulso eléctrico suficiente por parte del explosor, provocando el fallo de barrenos.
- El artillero debe manipular los detonadores tras haberse descargado antes de electricidad estática al suelo (mediante una pica de cobre, por ejemplo). Es necesario descargarse de electricidad estática de con frecuencia durante la carga de la voladura.
- Se debe llevar calzado y ropa de seguridad con características antiestáticas.
- En las proximidades de la voladura no debe haber ni teléfonos móviles encendidos, ni emisoras de radiofrecuencia. Es una buena práctica dejarlos todos apagados en un mismo contenedor dentro de un vehículo fuera de la zona de voladura. El facultativo al cargo, o un artillero con cargo de

responsable durante la carga, debe verificar que esto se cumple con cada persona que accede a la zona de voladura.

- Antes de su empleo en una zona nueva de voladuras, es recomendable evaluar el riesgo de corrientes erráticas y extrañas mediante un estudio técnico.
- Ante incertidumbre o situación de riesgo, se debe optar siempre por un sistema de detonadores inertes a los fenómenos electromagnéticos (sistema no eléctrico o electrónico).

3.2 DETONADOR NO ELÉCTRICO

Para solventar el principal problema del detonador eléctrico, en 1976 se desarrolla el sistema no eléctrico NONEL. En este sistema no existe ningún elemento eléctrico, por lo que es totalmente inerte a cualquier fenómeno electromagnético.

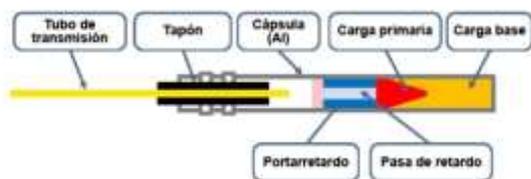


Figura 14: Esquema de un detonador no eléctrico

El detonador no eléctrico contiene un elemento de retardo, una carga primaria y una carga base, igual que el detonador eléctrico. Sin embargo, el elemento de retardo se inicia en este caso gracias a una onda de choque de baja intensidad que viaja a través de lo que se conoce como tubo de choque o de transmisión.

Este tubo de polietileno, muy fino pero muy resistente a los esfuerzos normales de tracción y de abrasión durante la carga, contiene un leve revestimiento interior de mezcla explosiva (octógeno – aluminio) que le permite transmitir una onda de

detonación de baja intensidad a una velocidad de unos 2.100 m/s. La intensidad de la onda es tan baja que el ruido que genera es tolerable y el tubo ni se destruye ni produce daños a su alrededor durante el uso. Este tubo se inicia bien mediante explosor especial o mediante un detonador eléctrico encintado a él. En este caso, gran parte de las ventajas de seguridad del sistema no eléctrico desaparecen. Por ello se recomienda su iniciación siempre mediante línea de tiro y explosor no eléctrico.



Figura 15: Sección de un tubo de choque

Es un sistema fiable y muy seguro en su manejo. Su gran desventaja es la imposibilidad de verificar el circuito antes de realizar el disparo.

La precisión de tiempos es similar a la de los detonadores eléctricos, muestran una dispersión en general aceptable, pero insuficiente para las aplicaciones que requieren una precisión exacta.

El sistema se compone siempre de al menos:

- Detonadores de fondo (disponibles en toda la serie de micro retardos, aunque suelen usarse en cantera y minería sólo en tiempos elevados: 450 /475 / 500 /525 ms).
- Conectores de superficie, con pinza o similar. Normalmente disponibles en

tiempos de 9 ms, 17 ms, 25 ms, 42 ms, 65 ms, 100 m, etc. Se usan para secuenciar la voladura en superficie. Estos elementos (normalmente pinzas de plástico) contienen en su interior un detonador que en general de baja potencia para producir poca metralla en superficie y no dañar la integridad del circuito de tubos. Sólo está indicado para la iniciación de tubo de transmisión.



Figura 16: conectores de superficie y detonadores de fondo no eléctricos

Algunos fabricantes suministran también elementos con el conjunto detonador de fondo – conector cada uno en un extremo del tubo.

Los detonadores no eléctricos pueden ir dotados del elemento conocido como conector J; que sirve para conectarlos a líneas maestras de cordón detonante de baja carga, normalmente de 5 – 6 g/m. El empleo de este tipo de detonadores es común en voladuras de avance en galerías y en ciertas voladuras de obra pública con bancos cortos. En este caso, la secuencia no se efectúa en superficie mediante conectores, sino haciendo uso del retardo de cada detonador de fondo. No es una práctica común en canteras y es recomendable hacer uso de conectores de superficie para secuenciar los tiros ya que

esta práctica genera menos ruido y metralla de piedras.

El sistema también incorpora líneas de tiro. Son rollos, de 100 m o 200 m, de tubo de transmisión con un conector en su extremo. Se inician mediante explosores no eléctricos. Esta es la forma recomendable de iniciar una pega no eléctrica para que se pueda considerar verdaderamente como no eléctrica.

La resistencia a tracción del tubo es aproximadamente de unos 20 kg (en función del fabricante). Esto permite bajar al fondo del barreno cebos y multiplicadores por gravedad sin riesgo de rotura. El sistema no está diseñado, para sufrir fuertes tirones con la finalidad de alargar los tubos. Cuando se producen fuertes tirones, se suelen provocar fallos en el sistema. Los detonadores y conectores deben ser objeto de un uso racional; siempre con la precaución de no dañar los tubos durante la carga o la compactación del retacado.

Las líneas de tubo en superficie nunca deben de quedar tirantes, sino holgadas descansando sobre el suelo. Se deben dejar, además, un mínimo de 2 m de tubo de transmisión entre pinzas al realizar las conexiones para que el conector funcione de forma correcta.

El desmontaje de la pinza de un conector en superficie para usar el detonador de su interior en la iniciación de cualquier cebo o línea de cordón es una mala práctica que conlleva fallos en la voladura. El detonador de la pinza solo se debe emplear dentro de la misma para la iniciación del tubo de transmisión.

3.3 DETONADOR ELECTRÓNICO

Representa el último desarrollo en materia de sistemas de iniciación. El detonador se compone de un elemento electrónico que se comunica con las unidades de programación y de disparo mediante dos hilos de cobre, un condensador eléctrico, una cerilla pirotécnica, una carga primaria y una carga base. Todos los componentes se encuentran también encapsulados y sellados en un casquillo de aluminio. Los extremos de los hilos de conexión van insertados en una pinza especial que se cierra fácilmente en la línea de disparo.

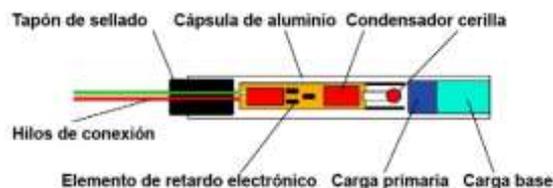
En este sistema, un elemento electrónico gestiona los tiempos de retardo, verifica el circuito y ejecuta el disparo a voluntad del artillero. Las ventajas de este tipo de detonadores son muchas:

- Seguridad antes del disparo. Se procede a la verificación total del sistema.
- Seguridad de manipulación, sólo se puede disparar con un explosor compatible con los detonadores empleados. No se pueden iniciar mediante ningún otro medio eléctrico, como explosores convencionales o baterías, ni se puede producir su encendido accidental debido a corrientes extrañas en el terreno o emisoras de radiofrecuencia, etc.
- Precisión.
- Flexibilidad total en el empleo de tiempos y programación.

Estas dos últimas ventajas son claves en procesos de reducción de vibraciones y optimización de la fragmentación, ya que las vibraciones terrestres producidas pueden ser previstas y modificadas porque no hay una superposición de ondas y se puede diseñar mejor la secuenciación de la voladura además la precisión del sistema implica una mejor cooperación entre barrenos. La mayor desventaja de este tipo

de detonadores es su mayor coste en comparación con otros sistemas de iniciación.

Figura 17: Detonador electrónico



4. ACCESORIOS DE VOLADURA

Para hacer posible la iniciación de los explosivos, es necesario proveer de la energía necesaria al sistema de iniciación correspondiente.

4.1 CORDÓN DETONANTE

Se trata de una línea flexible compuesta de un núcleo de pentrita (PETN) recubierta de diferentes capas textiles y plásticas aislantes de protección. En función del gramaje de pentrita por metro se emplea para diferentes tareas:

- 3 g/m - 6 g/m: Línea maestra de iniciación de detonadores no eléctricos.
- 10 g/m - 40 g/m: Continuidad en condiciones difíciles de carga. Iniciación en superficie de barrenos.
- 70 g/m - 100 g/m: Voladuras de contorno.

Cuando sea necesario cortar el cordón detonante, se debe emplear un cuchillo o navaja de hoja lisa y bien afilada al aire libre, sin ejercer ningún esfuerzo sobre el cordón. También se puede emplear una navaja de hoja de acero inoxidable. Una vez realizado el corte, los extremos del cordón se deben sellar con cinta aislante para impedir que el agua que haya dentro del barreno o en el terreno humedezca la pentrita del interior.

A la hora de hacer conexiones entre cordón y detonadores o entre líneas de cordón, se deben seguir las recomendaciones de uso del fabricante, estas proponen diversas formas de conexión, todas ellas fiables.

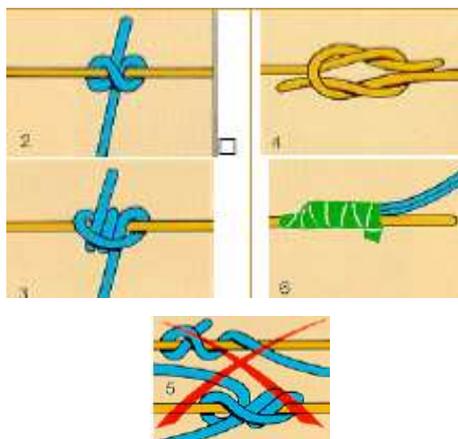


Figura 18: Posibles uniones de cordón detonante

Las conexiones más simples y fiables entre líneas de cordón detonante se realizan encintando bien las líneas, una junto a la otra de manera paralela, asegurando que estas se solapan al menos 20 cm entre sí. Hay que tener siempre en cuenta la direccionalidad de la detonación al encintar las líneas.

Se debe asegurar que las líneas de cordón estén bien extendidas y no se formen lazos o se crucen donde no deben para evitar fallos por cortes.

Cuando se usa cordón detonante dentro del barreno, es práctica habitual anudar el cordón de un carrete que se termina a mitad de carga con el cordón del carrete que se comienza a usar. Un nudo simple, tipo 8 y bien apretado, es una manera fiable y sencilla para anudar el carrete que se termina.

Los detonadores, generalmente, se encintan a las líneas de cordón en paralelo. En este caso nunca se deberá encintan en el

extremo mismo del cordón ya que podría estar húmedo y con poca sensibilidad, habría que dejar que el cordón cuelgue por detrás del detonador unos 15 cm. El extremo sobrante se curva en 180° y se encinta al detonador.

Las uniones entre detonadores y líneas de cordón más fiables son las que se hacen de manera axial ya que el detonador transmite mejor y a mucha mayor distancia su energía de choque en esa dirección. Para esto, se encinta el detonador al extremo del cordón, asegurando que la cápsula del detonador está bien alineada con el extremo del cordón. Este tipo de unión requiere un poco más de tiempo en su preparación, pero es la manera más segura de unión. Es necesario tener siempre en cuenta la direccionalidad de la detonación.

4.2 MULTIPLICADORES (BOOSTERS)

Los multiplicadores (también conocidos como boosters) se utilizan para iniciar explosivos de baja sensibilidad, como pueden ser anfo, hidrogeles o emulsiones, tanto si se emplean encartuchados o a granel.

Los multiplicadores pueden ser de diferentes composiciones, como por ejemplo TNT, Pentolita, etc. Son explosivos de alta densidad, potencia, velocidad y presión de detonación, siempre sensibles al detonador.



Figura 19: Booster de TNT

Son cilindros sellados de plástico que contienen el explosivo en su interior. Tienen un agujero central en su eje longitudinal que permite el paso de los cables del detonador y/o de una línea de cordón detonante. Además, disponen de uno o dos orificios para insertar en ellos los detonadores.

Debido a su densidad y sus propiedades explosivas son el medio de iniciación más fiable.

5. EFECTO DE LA INICIACIÓN EN LOS EXPLOSIVOS

Cuando se inicia de manera defectuosa un explosivo, o bien no llega a detonar o lo hace de manera defectuosa sin proporcionar toda su energía. Esta reacción, además, viene acompañada por humos de mala calidad.

La elección del tipo y tamaño del cebo es crucial para obtener unos buenos resultados y se debe basar en cuestiones puramente técnicas. La localización del cebo tiene efectos claros en los resultados de la voladura.

Para transmitir una onda de detonación desde el cebo a otra carga, el explosivo del cebo debe generar suficiente energía de choque como para provocar que el explosivo receptor sea iniciado a su velocidad de detonación nominal.

Si la presión de detonación de la columna es igual o menor a la presión de detonación del cebo, entonces la columna se iniciará a su velocidad de detonación nominal. Sin embargo, si la columna tiene una presión de detonación más alta que el cebo, entonces la velocidad de detonación en la columna será menor que la nominal; aunque alcanzará su valor nominal a una distancia equivalente a tres veces el diámetro de cartucho (o de barreno para explosivos a granel). Por este motivo, la cadena de iniciación dentro del barreno debe ser siempre de explosivos de mayor a menor presión de detonación.

Si la presión de detonación no es suficiente para activar la reacción de detonación en el explosivo receptor, se produce el fallo total en la iniciación.



Figura 20: Columna de explosivo de un barreno fallido

6. INICIACIÓN DEL BARRENO

Se puede llevar a cabo de dos maneras, bien desde la superficie, mediante el empleo de cordón detonante; o bien desde el fondo del barreno, mediante detonadores insertados en un cebo.

El empleo de cordón detonante desde la superficie es un sistema fiable y robusto, simple de concebir y fácil de usar; sin embargo, los detonadores en el fondo

proporcionan un mejor control ambiental y un mayor grado de eficiencia de voladura.

6.1 INICIACIÓN EN SUPERFICIE

Consiste en preparar un booster o un cartucho cebo de explosivo sensible al cordón detonante de gramaje medio, normalmente dinamita o emulsión. El cebo se atraviesa con un punzón de manera transversal y se hace pasar por él un cordón detonante que se asegura al cebo con un nudo. Además, el cordón detonante se enlaza al cebo y se fija bien a él con ayuda de cinta adhesiva. El cebo, fijo al cordón, se hace bajar hasta el fondo del barreno. Solo se debe preparar un cebo para su carga inmediata en el barreno.

Encima del cebo se cargan más cartuchos para completar la carga de fondo y sobre la carga de fondo se coloca la carga de columna y el retacado.

El cordón se corta asegurando que sobresalga sobradamente del emboquille del barreno. El cordón que sobresale del retacado se encinta a un detonador, eléctrico por lo general, que dará la iniciación al barreno.

Para mejorar la fragmentación y limitar la generación de vibraciones, las voladuras se llevan a cabo siempre secuenciando los barrenos. Para ello, se encinta a cada línea de cordón un detonador eléctrico con un retardo diferente, en función del diseño de la secuencia de disparo. Se mejora la fragmentación al crear nuevas caras libres con la detonación de cada barreno y se reduce la vibración al reducir la carga operante.



Figura 21: Esquema de iniciación en superficie

Al usar detonadores eléctricos, el máximo número de detonaciones independientes (sin repetición de tiempos) viene limitado por la serie de micro retardos del fabricante (del orden de 20).

En este método de iniciación, el cordón detonante inicia de manera lateral la carga de explosivo de todo el barreno, salvo que los explosivos encima del cebo no sean sensibles al cordón. En este caso, el cordón detonante estará dañando una porción importante de explosivo antes de que éste reciba la iniciación axial desde el fondo. Esta situación no es recomendable, por ese motivo, este método no se debe usar en barrenos cargados con mezclas a granel de emulsión y ANFO que no sean sensibles al cordón detonante.

Aunque la iniciación lateral de emulsiones y geles sensibles al detonador provoca una detonación mucho más pobre, para la mayoría de los propósitos se considera aceptable; ya que asegura que todo el explosivo es iniciado y destruido en la voladura.



Figura 22: Barrenos iniciados en superficie. Se aprecia el efecto negativo de la rotura del retacado

El principal problema de este método se debe a que el cordón detonante pasa a través del retacado y se produce la rotura de éste cuando se inicia el barreno. Esto provoca el “soplado” de los barrenos por el emboquille, liberando los gases de la detonación y proyecciones. El grado de confinamiento de la carga se reduce significativamente y el rendimiento del explosivo sufre un detrimento importante; pudiendo afectar significativamente a los resultados de la voladura.

Otro factor importante en este tipo de voladuras es el ruido generado; ya que hay cordón detonando al aire y además los gases de voladura provocan un fuerte estruendo.

Debido a los factores mencionados en los párrafos anteriores, se recomienda realizar la iniciación de los barrenos de cualquier longitud con detonadores de fondo.

6.2 INICIACIÓN EN FONDO

Es el método más habitual. El sistema de iniciación más empleado en la iniciación en fondo es el detonador no eléctrico con conectores en superficie; pero cada vez se usan más los detonadores electrónicos por las ventajas que ofrecen.

La operativa de la carga de fondo es la siguiente:

- Cuando se emplea emulsión de alta energía como carga de fondo y no se perciben vetas de arcilla que puedan cerrar las paredes aislando cartuchos y no se han detectado problemas en la perforación (integridad de las paredes del barreno), es recomendable dejar caer en el barreno dos cartuchos en la carga de fondo antes de bajar el cebo. Esto se realiza por dos motivos:
 - Procurar que el cebo esté situado separado del barro y del material sucio del fondo.
 - Procurar que el cebo esté al nivel del pie del banco, donde realiza un trabajo más efectivo.
- Esta práctica no es recomendable con dinamitas como carga de fondo, ya que tras la voladura podría quedar un cartucho sin detonar en la pila del escombros provocando una situación de peligro.
- Con un punzón se perfora un orificio para alojar cada detonador que se vaya a emplear. Se perfora de abajo a arriba en un lateral del cartucho y cerca de uno de los extremos del mismo.
- Se inserta en cada orificio un detonador apuntando hacia la superficie.
- Se enlazan los tubos o hilos de los detonadores al cebo y se encantan a él con cinta adhesiva. El cebo solamente debe prepararse para su carga inmediata.
- Se baja el cebo con cuidado de no dañar los hilos o los tubos. No se debe dejar caer por gravedad sino sosteniendo ligeramente su peso para frenarlo.
- Se termina de cargar el barreno según el plan de diseño y se retaca.
- Los tubos o hilos sobresalen del retacado y se usaran para unir los barrenos entre sí gracias a los conectores de superficie.

En caso de cargar con mezclas a granel de ANFO/emulsión fabricadas in situ, se procede de una manera similar:

- Se baja el booster al fondo del barreno con uno o dos detonadores en sus orificios.
- Se baja la manguera hasta el fondo del barreno. El extremo de la manguera debe quedar justo encima del booster para evitar que éste ascienda a la superficie, debido al empuje de la emulsión al comenzar el bombeo.



Figura 23: Preparación de un booster de cebo con dos detonadores

- Se comienza el bombeo. Tras llenar unos 2 o 3 metros de barreno, se comienza la retracción de la manguera y se tira suavemente de los hilos de los detonadores, subiendo el cebo 1 metro aproximadamente para asegurar que éste quede en contacto absoluto con el explosivo y a la altura del pie de banco.
- Se termina de cargar el barreno. Hay que parar la carga a una distancia determinada por debajo de la profundidad del retacado; para permitir que el explosivo se termine de sensibilizar mediante expansión química.
- Una vez terminada la expansión química del producto, pasados unos 10 o 15 minutos, se verifica con cinta de medir la profundidad del retacado y, si es la correcta, se retaca el barreno.

Con iniciación en fondo, se recomienda siempre usar dos detonadores por cada

columna de explosivo para reducir el riesgo de fallos.



Figura 24: Esquema de iniciación en fondo de barreno

En barrenos cortos, ambos detonadores pueden ir alojados en el mismo cebo, cerca del fondo del barreno (iniciación en un punto).

Pero en caso de trabajar con barrenos de una cierta longitud (>10 m), es preferible que uno de los detonadores se coloque en un segundo cebo, situado en la parte superior de la columna de explosivo (iniciación en dos puntos). El detonador de arriba debe ser de un retardo superior al de abajo (más de 25 ms como regla general) y sólo hará su función de seguridad en caso de fallo del detonador de fondo o en caso de discontinuidad en la columna de explosivo. En cualquier caso, el detonador y el cebo de seguridad se destruyen en la detonación.

La iniciación en dos puntos reduce las posibilidades de padecer fallos ocasionados por cortes de barrenos durante la pega o por pérdida inadvertida de la continuidad durante la carga.

Cuando se disparan barrenos con la carga dividida por retacados intermedios para reducir el nivel de vibración, se procede de forma similar. Las cargas superiores deben ir secuenciadas en primer lugar para que éstas vayan abriendo cara libre a las de

abajo. Los retacados intermedios deben ser de una longitud suficiente que impida la detonación por simpatía de la inmediatamente inferior. No es frecuente disparar más de tres cargas separadas por barreno para reducir vibraciones. Cada una de las cargas debe llevar dos detonadores que se alojan en un mismo cebo en el fondo de ésta.

6.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Puede ser necesario combinar sistemas de iniciación para resolver problemas de carga asociados a barrenos complejos. Por ejemplo, al cargar ANFO en barrenos perforados en un terreno muy fracturado, se podría necesitar dividir la carga varias veces con retacados intermedios para evitar que el explosivo a granel llenase cavidades o grietas de la roca. En ese caso, una línea de cordón detonante del gramaje apropiado se podría usar para mantener unidas todas las cargas a lo largo del barreno; utilizando los dos detonadores con cebos en las cargas inferior y superior solamente. Para evitar dañar el retacado final, se recomienda cortar el cordón y encintarlo a los tubos de los detonadores de manera que quede por debajo del material de retacado.

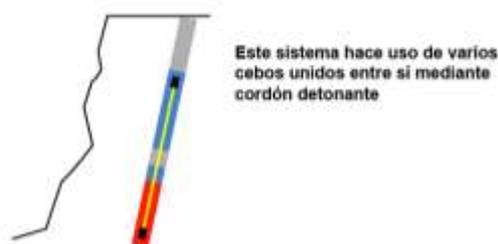


Figura 25: Posible esquema híbrido de iniciación de un barreno haciendo uso de cordón y cebos

7. CONEXIÓN DE LA VOLADURA Y COMPROBACIONES EN EL CIRCUITO

7.1 PEGAS ELÉCTRICAS

El circuito de disparo se compone de la línea de tiro y de los detonadores conectados en serie. Antes de conectar la línea de tiro al circuito de detonadores en serie, ésta debe ser comprobada con el óhmetro para verificar su integridad.

Una vez conectada la línea de disparo, se procede a la comprobación del conjunto del circuito. Se requiere que la comprobación eléctrica del circuito se lleve a cabo con un óhmetro homologado por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, en buen estado de funcionamiento. La comprobación se llevará a cabo una vez que la zona de peligro de voladura haya sido evacuada y después de que los accesos a la misma hayan sido cortados.

Esta comprobación se llevará a cabo desde el mismo lugar seguro, previamente elegido para el disparo.

Las características eléctricas de los detonadores se deben conocer de antemano para realizar la comprobación de forma correcta. Es importante mencionar que la resistencia de cada detonador es la suma de la resistencia del puente de la cerilla y de la resistencia de sus hilos de cobre. En caso de duda sobre estos valores, es necesario consultar con el proveedor o fabricante.

El circuito de voladura sólo se puede conectar al explosor en el lugar de disparo, una vez comprobado el circuito y con la certeza de que la zona de riesgo está evacuada y los accesos cortados. Solo

entonces se puede proceder con el protocolo de disparo de la voladura. La llave del explosor solo puede estar en poder del artillero con la responsabilidad del disparo.

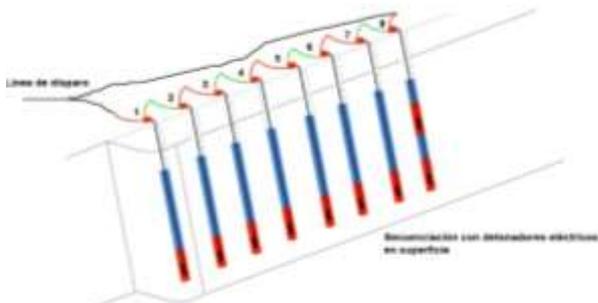


Figura 26: Secuencia en superficie con detonadores eléctricos

7.1.1 COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CIRCUITO

La resistencia resultante de un circuito en serie es la suma de todas las resistencias unitarias que componen el circuito.

La lectura del óhmetro puede advertir fallos en la conexión del circuito o en su integridad:

- El óhmetro muestra valor infinito. El circuito se ha roto o alguna línea ha quedado abierta. Si una primera inspección visual no localiza el fallo, se hace necesaria la comprobación del mismo por partes hasta localizar el fallo.
- El óhmetro muestra un valor demasiado alto. Puede haber alguna conexión incorrecta.
- El óhmetro muestra un valor demasiado bajo. Existe un cortocircuito, algún detonador no está conectado o hay derivaciones en el terreno.
- La lectura no es constante. Indicaría conexiones defectuosas entre detonadores o a la línea de disparo.

Estimar la resistencia de un circuito compuesto por:

- 30 detonadores eléctricos de resistencia unitaria total de 1 ohm
- 50 metros de hilo de conexión
- 150 metros de línea de tiro

RESPUESTA

30 dets a 1 ohm cada uno	30 ohms
50 m de hilo de conexión a 6 ohm/100 m	3 ohms
150 m de línea de tiro a 4 ohm/100 m	6 ohms
Resistencia total	39 ohms

Figura 27: Ejemplo de cálculo de la resistencia de un circuito en serie

7.2 CIRCUITOS DE DETONADORES ELECTRÓNICOS

Existen diferentes sistemas en el mercado; todos son bastante parecidos en su funcionamiento, pero presentan ciertas peculiaridades en su manejo que les confieren ventajas e inconvenientes entre sí.

- Los detonadores se introducen con los cebos en el barreno. El cebo sólo se debe preparar antes de su uso inmediato.
- Se procede a programar los detonadores, uno a uno, con una consola electrónica especial según un esquema predeterminado. Esta tarea la debe llevar una sola persona, siguiendo un orden lógico. Es buena práctica programar los detonadores conforme se van cebando los barrenos, antes de cargar el barreno por encima del cebo. Esto permite reemplazar un detonador si éste no responde correctamente; aunque este fallo es muy poco frecuente.
- Se le otorga a cada detonador el retardo deseado mediante el teclado de la consola. Cada detonador tiene una identificación única en su chip y se va generando en la consola una lista de tiempos de programación - ID de detonador. Si el detonador es defectuoso o no logra comunicarse con la consola se detecta en esta primera etapa.

- Una vez cargada la voladura, se tira una línea de disparo especial en la zona de voladura a la que se van conectando todos los detonadores, uno a uno, mediante su pinza de conexión. Esta pinza lleva un gel en su interior que, al cerrarse, sella la conexión evitando que se produzcan fugas. Esta tarea debe llevarse a cabo por el menor número de personas y deben seguir un orden lógico (por ejemplo, cada uno conecta una fila).
- Pese a que el sistema comprobará más tarde si hay conexiones fallidas o si han quedado detonadores sin conectar por olvido, es recomendable hacer una revisión minuciosa del circuito e ir marcando con espray las conexiones ya revisadas.
- Una vez conectados todos los detonadores a la línea de tiro, se conecta la consola de programación. Esta tarea se puede hacer en la zona de voladura ya que con este sistema no existe riesgo alguno de iniciación prematura. En esta fase cada detonador se comunica de nuevo con la consola de programación y responde a sus diferentes llamadas para efectuar una triple verificación:
 - Integridad del circuito y derivaciones.
 - Conteo de detonadores conectados.
 - Búsqueda de detonadores programados y no conectados.



Figura 28: Conexión de detonadores electrónicos a la línea

Una vez en el lugar seguro de disparo, con la zona de peligro evacuada y los accesos cortados, se conecta la línea de tiro al explosor y se transfiere la información de la consola de programación al explosor. Cada detonador se comunica con el explosor, procediendo a una nueva verificación triple. Si se recibe el OK para el disparo por parte del explosor, se puede proceder el protocolo de disparo de la voladura.

El chip del detonador permite la carga del condensador eléctrico (proceso de armado de detonadores) y asegura, con precisión de 1ms, que éste enciende la cerilla pirotécnica en el instante requerido cuando el artillero pulse el botón de fuego.

Durante el proceso de verificación y armado de los detonadores, se puede abortar el disparo sin riesgo. Sólo el artillero con responsabilidad en el disparo debe disponer de la llave del explosor.

7.3 PEGAS NO ELÉCTRICAS

El método más popular de iniciación a cielo abierto es el uso de detonadores no eléctricos en fondo de barreno. Se requiere que todos los detonadores del fondo sean del mismo retardo (generalmente 475 ms o 500 ms). De esa forma se asegura que una gran parte de los conectores de superficie, si no todos, hayan sido iniciados antes de que detone el primer detonador de fondo de la pega. Esto evita que el movimiento de la roca durante la voladura pueda cortar el circuito de conectores en la superficie.

La secuenciación entre barrenos se produce en superficie mediante conectores que proporcionan retardos entre barrenos de 9, 17, 25, 42, 65, 100 ms. El uso de los conectores puede presentar algunas diferencias ente fabricantes y modelos. Es



Figura 32: Conexiones enterradas en 20 cm de tierra o material de retacado

Si el circuito no eléctrico va a ser iniciado por un detonador eléctrico, se debe comprobar el circuito eléctrico antes de la pega. El detonador eléctrico que se encinta al tubo no eléctrico también debe cubrirse con 20 cm de material de retacado para evitar que la metralla dañe el resto del circuito.

8. CONDICIONANTES AL DISEÑO DE VOLADURAS EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO

Existen múltiples factores y restricciones que influyen en el diseño de la voladura. Se debe tener un buen conocimiento de la geometría del yacimiento y las condiciones del entorno antes de proponer un diseño de voladura y hay una serie de cuestiones que se deben tener en cuenta antes de hacer un diseño de voladura.



Figura 33: Tipos de condicionantes a un diseño de voladura

8.1 POTENCIA Y MORFOLOGÍA DEL YACIMIENTO

Limita la altura del banco de voladura, especialmente en depósitos horizontales o casi horizontales donde la potencia del yacimiento iguala la altura del banco.

8.2 DUREZA DE LA ROCA

Influye en el tipo de perforación y en su coste por metro lineal. El tipo de explosivo, malla de perforación y secuenciación dependen directamente de este factor.

8.3 PRESENCIA DE JUNTAS Y PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN

Puede afectar a los resultados de la voladura más que cualquiera de las propiedades del explosivo. Su frecuencia o espesor y su orientación respecto a la dirección de la voladura se deben tener muy en cuenta.



Figura 34: Condiciones geotécnicas muy complejas que impiden una fragmentación homogénea

La existencia de una estratificación fina facilita una fragmentación reducida, un buen desplazamiento y una pila de voladura esponjada con un consumo específico más reducido. Cuando el material es duro y masivo se necesita un consumo específico mayor.

Las diferentes familias de juntas y planos de estratificación pueden aislar bloques que quedarán libres de la voladura independientemente de la potencia del explosivo. En este caso, la solución puede pasar por reducir el diámetro de perforación y cerrar la malla en proporción, tratando de perforar entre juntas.

Cuando los planos de estratificación superiores provoquen la generación de bloques en la zona del retacado, una pequeña carga de goma situada en el retacado puede ayudar a romperlos durante la voladura. Otra opción es perforar barrenos cortos intercalados con los barrenos largos de la pega y cargarlos ligeramente con uno o dos cartuchos de goma en pequeño calibre.

La orientación de los planos respecto a la dirección de voladura afecta tanto a la fragmentación como al estado final del frente después de la pega y a la estabilidad de este. De manera genérica, se puede decir que la dirección de voladura más favorable busca “golpear” con la detonación a los planos de juntas predominantes de una manera lo más perpendicular posible a estos. Esta situación proporciona los mejores resultados de fragmentación.



Figura 35: Presencia de planos horizontales de estratificación separando zonas de dureza variable

La orientación de los planos y su cohesión afecta a la facilidad que tienen estos a moverse durante la voladura, cortando barrenos durante la pega. La presencia de material blando entre juntas puede incrementar el riesgo de desensibilización por presión y corte de barrenos.

8.4 TAMAÑO DE LA OPERACIÓN

En el tamaño de la operación influye principalmente el tamaño de la maquinaria de carga, transporte y de machaqueo. La maquinaria más grande acepta fragmentación más gruesa y el tamaño que acepta el primario suele marcar la definición de los sobretamaños o bolos. Además, una maquinaria más grande requiere voladuras más grandes.

8.5 FORMA DE PILA DE ESCOMBRO

Las palas de ruedas operan mejor con pilas extendidas y de no mucha altura. Esto se consigue con bancos de mayor altura y voladuras de una sola fila.

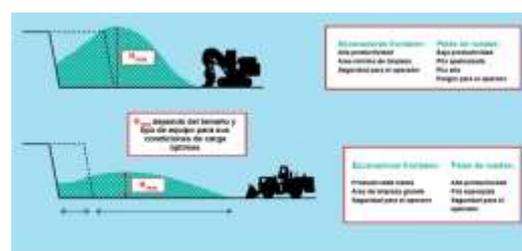


Figura 36: Consideraciones sobre la forma requerida de la pila de material en función de la maquinaria disponible

Por el contrario, las excavadoras frontales son más productivas en pilas más compactas y de mayor altura. Esto se consigue con voladuras multi-filas y con un banco de menor altura. La secuencia entre barrenos y entre filas juega también un rol importante en este aspecto. Tiempos cortos



entre barrenos proporcionan más empuje y una pila de escombros más tendida.

Se debe tener en cuenta también que ciertas máquinas como dragalinas y retroexcavadoras se asientan en la pila de escombros durante la carga. Por este motivo la pila debe ser estable y suficientemente compacta para sostener su peso.

8.6 NIVEL DE FRAGMENTACIÓN

El nivel de fragmentación suele venir marcado por el tamaño y el tipo de machacadora primaria disponible.

Para la mayoría de aplicaciones finales e, independientemente del tamaño de la maquinaria disponible, una fragmentación más fina se suele traducir en una reducción de costes totales de producción ya que se minoran importantes costes energéticos como son los costes de la fragmentación secundaria, carga y machaqueo.

Para cada explotación existe un óptimo de fragmentación que genera el coste global más reducido y que se debe buscar siguiendo una metodología de mejora continua.

En ciertas aplicaciones no se persigue una fragmentación fina tras la voladura, como es el caso de la generación de escolleras para defensas marítimas. También entran en este apartado aquellas explotaciones que alimentan plantas de tratamiento de mineral que desechan los tamaños más finos durante su proceso. En ocasiones se producen pérdidas de reservas muy importantes en el yacimiento al desechar estos finos por lo que es muy importante que en el diseño de la voladura se incluyan parámetros para minimizar esta pérdida.

8.7 TIPO DE MAQUINARIA DE PERFORACIÓN

En términos de seguridad y resultados, la calidad de la perforación resulta en muchas ocasiones más importante que las propiedades del explosivo o detonadores que se emplean.

Los bancos cortos se deben perforar con máquinas de martillo en cabeza que son más rápidas, además pueden perforar diámetros menores y donde la desviación de las perforaciones no llega a ser muy pronunciada. Los bancos de una cierta altura (a partir de unos 12m) se deben perforar con máquinas de martillo en fondo ya que, por su forma de trabajo y su varillaje más grueso, mantienen un barreno más recto y uniforme incluso en los bancos más altos.

En ocasiones se deben afrontar casos excepcionales, debido a la ausencia de la maquinaria más adecuada para el tipo de trabajo requerido. Por ejemplo, estaremos obligados a perforar bancos cortos (4 o 5m) con una máquina de martillo en fondo a diámetros más grandes (4" o más) lo cual compromete la longitud apropiada del retacado final; o estaremos obligados a emplear una máquina de martillo en cabeza en bancos de 15 metros o más, arriesgándonos a sufrir desviaciones importantes a partir de los 3 o 4 últimos metros de perforación. En estos casos en los que la seguridad de la operación se vea comprometida, se hace aún más que recomendable, imprescindible, una escrupulosa supervisión del frente y de la desviación de los barrenos para adaptar la carga y el retacado de manera correcta.



Figura 37: Carro de perforación de martillo en fondo

8.8 CANTIDAD DE AGUA EN LOS BARRENOS

La presencia de agua en los barrenos es una circunstancia frecuente que siempre genera problemas de mayor o menor importancia. Primeramente, imposibilita la utilización de explosivos tipo ANFO debido a que el nitrato amónico se disuelve en agua. Esto encarece la voladura notablemente ya que obliga al empleo de sistemas de desagüe de barrenos o al uso de explosivos resistentes al agua como una emulsión encartuchada o a granel.

Cuando el agua presente en el barreno se deba a la infiltración del terreno y su flujo de entrada no sea muy grande, existen equipos de desagüe efectivos incluso en diámetros pequeños, que permiten evacuar el agua de manera más o menos rápida. Si después de retirar el agua dentro del barreno se pretende cargar con ANFO, se hace necesario enfundar el barreno con una bolsa cilíndrica de plástico antiestático antes de cargar el ANFO.

Cuando se perfora por debajo del nivel freático natural o el flujo de agua es demasiado grande, el desagüe del barreno

no es una opción y esta situación tan sólo se puede resolver con el uso de un explosivo resistente al agua.

En cualquier caso, la carga de barrenos con agua, incluso con mezclas de emulsión/ANFO desde el fondo del barreno o con explosivos encartuchados puede generar otros problemas, como interrupciones en la continuidad de la carga, que hay que tener en cuenta antes de empezar la operación de carga de los barrenos. Por este motivo, la presencia de agua en los barrenos se debe tener siempre en cuenta y se debe verificar antes de producir un diseño de carga seguro.

8.9 INTEGRIDAD DE LOS BARRENOS

En terreno muy fracturado, o con cuevas u oquedades, se debe cuestionar la iniciación en fondo y considerar la iniciación en superficie o el empleo de cordón detonante en un método híbrido. Si este problema es muy recurrente en una zona concreta una posible solución puede ser entubar los tiros con PVC antiestático.

8.10 PROXIMIDAD A ESTRUCTURAS SENSIBLES, ZONAS HABITADAS Y RESTRICCIONES LEGALES

Las restricciones medioambientales como consecuencia de la generación de vibraciones, onda aérea y polvo determinan el tamaño de la voladura, la hora de disparo, la carga máxima instantánea (MIC) y la secuencia de iniciación. Todos estos parámetros pueden modificarse durante el diseño de la pega para adaptarse a la situación de manera razonable.

9. SUPERVISIÓN DEL FRENTE Y DE LOS BARRENOS

La calidad en la ejecución de la perforación (emboquille, longitud, ángulo, azimut y profundidad) es, en general, bastante más importante que las propiedades del explosivo en sí. De poco o nada sirve cargar perfectamente cada barreno con un explosivo de propiedades idóneas y secuenciar los barrenos perfectamente si, después, estas cargas explosivas están en el lugar incorrecto para realizar su trabajo.

En aras de la seguridad de las operaciones, para evitar proyecciones que pueden ocasionar gravísimos daños materiales y personales, se hace imprescindible conocer con detalle la forma del frente de voladura y su posición relativa de todos los barrenos a lo largo de toda su profundidad.

Los resultados de la voladura en términos de vibraciones, fragmentación, esponjamiento, etc. también dependen de manera fundamental del grado de conocimiento que tenemos de la geometría frente / barreno.

9.1 SUPERVISIÓN DEL FRENTE

El frente de voladura nunca es una cara perfectamente plana y tendida de ángulo constante. En ocasiones se asemeja a este modelo ideal; pero a menudo presenta grandes desviaciones. Este hecho ocasiona variaciones de la piedra delante del barreno que puede generar situaciones de riesgo y ser causa de mal arranque, fragmentación pobre y problemas de vibraciones acusados.

Es esencial, por tanto, conocer la forma del frente antes de hacer un diseño de voladura en banco que ofrezca unas garantías mínimas de seguridad y de resultados. Para

ello se producen modelos digitales en 3D del frente que después se tratan y estudian con un software de diseño de voladuras.

Esta tarea se puede realizar de dos maneras, bien con equipos de perfilometría láser 3D (los sistemas 2D no son herramientas suficientemente fiables para hacer un trabajo preciso) o bien mediante fotografía desde un dron.

El perfilómetro láser 3D se asemeja a un teodolito y se emplea para tomar distancias y ángulos de puntos del frente respecto de unos puntos de referencia establecidos. De este modo, se genera una nube de puntos que se transforma en un modelo tridimensional. Con el perfilómetro también se toma la posición exacta de los emboquilles de los barrenos en el banco de voladura.

Es recomendable realizar el levantamiento con al menos tres puntos de referencia en la explotación con coordenadas GPS conocidas. De esta manera la posición de los emboquilles quedan referenciadas y, en caso de fallo en la voladura, los barrenos podrían localizarse de forma rápida y fiable.



Figura 38: Modelo tridimensional de un frente de voladura

Toda esta información se introduce en un software de diseño que reproduce este modelo 3D e incluye inicialmente unos barrenos teóricos (ideales, sin desviación) con la inclinación, azimut y profundidad

prefijados en los puntos tomados con el perfilómetro.

9.2 SUPERVISIÓN DE LOS BARRENOS

Este modelo generado en 3D aún no es completo para producir un diseño de voladura seguro y fiable en resultados. Falta algo determinante: conocer la trayectoria real de los barrenos. Los posibles errores que podemos encontrar tras la perforación son:

- Emboquilles en lugar incorrecto.
- Profundidad incorrecta del barreno.
- Inclinación incorrecta (ángulo diferente del planeado). Este error provoca distancias incorrectas a la cara libre, pudiendo ser una causa posible de proyecciones (ángulos mayores al planeado) o de altos niveles de vibración (ángulos menores al planeado).

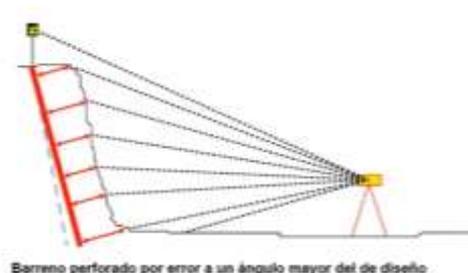


Figura 39: Errores en el ángulo de perforación. Variación de la distancia real a la cara libre

- Azimut incorrecto. Es el error en la dirección de perforación respecto a la perpendicular al frente de voladura. El espaciamiento real entre los barrenos se ve afectado en consecuencia.



Figura 40: Influencia del azimut en el espaciamiento entre barrenos

- Desviación. La sarta de perforación tiende a pandear y desviarse de la línea recta con la profundidad. Esta posibilidad de error se aumenta considerablemente en máquinas de martillo en cabeza. Existen parámetros geológicos que favorecen la desviación de perforación: juntas inclinadas, variación en la dureza de la roca, cavidades, etc.

La desviación se puede producir en cualquier plano, pudiendo ocasionar piedras reales en el frente muy reducidas (proyecciones) o demasiado grandes (mala fragmentación y vibraciones) y/o espaciamientos incorrectos entre los barrenos que ocasionan un reparto desigual de la carga de explosivo y traen como consecuencia repiés en las zonas de mayor espaciamiento y proyecciones en las zonas de concentración de barrenos.

Una buena manera de efectuar una supervisión de manera fiable en cualquier tipo de barreno, es mediante una sonda electrónica especial. La sonda se hace descender poco a poco en el barreno y se toman medidas cada metro (el cable lleva unas cuentas por metro que ayudan a hacer esto). Los inclinómetros en el interior de la sonda van registrando la trayectoria real de la misma, metro a metro.

Esta información se trata después con un software de diseño, insertándola en el modelo 3D previamente generado para el frente. De esa manera se conoce la posición real y trayectoria de cada barreno respecto al frente.

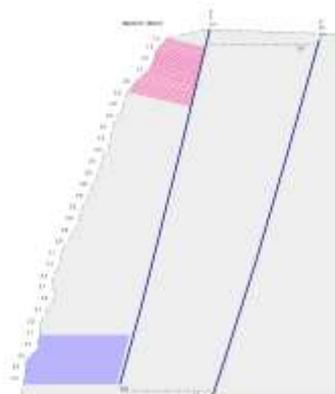


Figura 41: Perfil de una perforación real, obtenida mediante sonda electrónica

Esta operación de supervisión es imprescindible en los barrenos adyacentes a una cara libre por motivos de seguridad (primera fila de barrenos); pero es recomendable realizarla en todos los barrenos de la voladura.

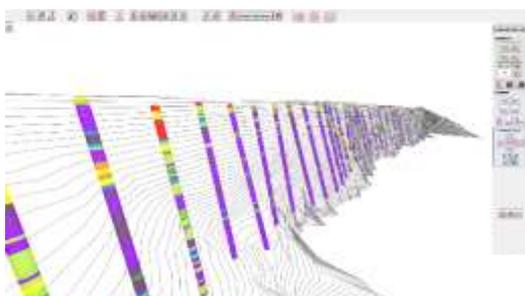


Figura 42: Vista real de una perforación en banco, obtenida mediante láser 3D y sonda de medición de barrenos

9.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Existen dos opciones posibles, una correctiva a los problemas que se presentan en el frente y una preventiva, que trata de evitar estos problemas, posicionando de antemano los barrenos en su localización más favorable.

9.3.1 METODOLOGÍA CORRECTIVA

En este caso, los barrenos ya están perforados antes de supervisar el frente con un dron o láser 3D. Se introduce la sonda para conocer la trayectoria de los barrenos. El frente y las posiciones de los emboquilles se toman con el perfilómetro láser o con el dron. Toda la información se introduce en un software y se reproduce y estudia el modelo para calcular una carga de diseño por barreno.



Figura 43: Metodología correctiva

Con esta metodología de trabajo tan sólo se puede actuar sobre la carga de explosivo y la posición de los retacados de diseño a posteriori para minimizar riesgos de proyecciones y tratar de obtener resultados aceptables. Se llega a una situación segura en cuanto al riesgo de proyecciones y otros problemas, pero no es una metodología recomendable para obtener un reparto correcto de la energía en todo el frente y, por tanto, unos resultados óptimos de la voladura. No evita, por tanto, que parte de la perforación sea malgastada; teniendo que rellenarla con material inerte para evitar males mayores en forma de proyecciones.

9.3.2 METODOLOGÍA PREDICTIVA

Antes de perforar los barrenos, se supervisa el frente con el dron o perfilómetro 3D y se

obtiene su modelo tridimensional. Con esta información es posible replantear la posición de emboquille, ángulo y azimut de los barrenos para que éstos se ajusten lo máximo posible a la piedra de diseño respecto al frente y la energía del explosivo se reparta de manera uniforme en el banco a volar. Después de perforar la pega, se supervisa la trayectoria real de los barrenos. Esta información se incorpora al modelo 3D del frente y se obtiene un modelo final para el diseño de la carga de cada barreno.

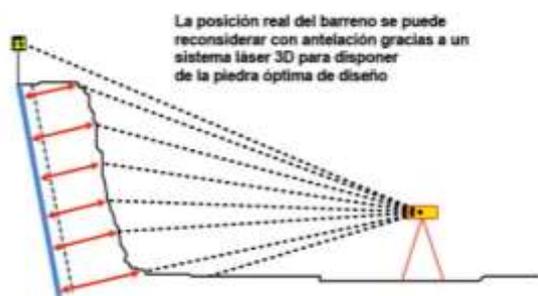


Figura 44: Replanteamiento de la posición del barreno para adaptarse a la piedra de diseño

Esta es la metodología recomendable para evitar situaciones de piedra reducida o excesiva antes de llegar a perforar los tiros. A veces no es posible poner en práctica esta metodología porque la explotación no dispone de un frente limpio para perfilar, pero, siempre que sea posible, se debe operar de esta manera.

10. MECANISMO DE ROTURA DE LA ROCA

Cuando se detona una carga explosiva dentro de un barreno, hay una liberación súbita de energía en la forma de un gran volumen de gases a alta presión y temperatura.

Esta energía no se emplea completamente en desarrollar trabajo mecánico dentro del

macizo, sino que se producen pérdidas en forma de:

- Calor residual en los productos de explosión.
- Calor empleado en la evaporación del agua en el interior del barreno.
- Calor consumido en aumentar la temperatura de la roca que rodea la carga.
- Pérdidas de calor a la atmósfera.
- Ruido y vibración.

10.1 ENERGÍA DE CHOQUE

En primer lugar, se produce una fuerte onda de compresión concéntrica desde el barreno. Esta onda de compresión pulveriza por completo la roca en un fino anillo que rodea el barreno, pero su intensidad va decreciendo rápidamente con la distancia. Esta onda de compresión tritura la roca mientras su intensidad sea superior a la resistencia de rotura a compresión de esta. Se producen de este modo una serie de grietas radiales de una longitud reducida. Más allá de éstas, el tren de ondas provoca la vibración en el terreno sin afectar la integridad del material.

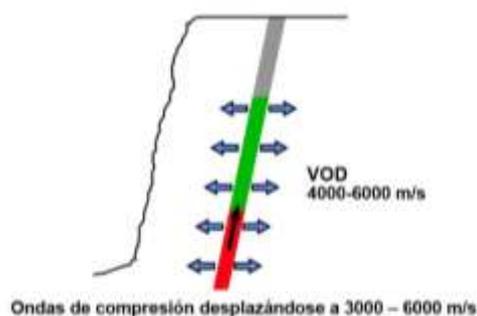


Figura 45: Esquema de generación de un tren de ondas de compresión alrededor del barreno

Sin embargo, esta onda de compresión, al llegar a una cara libre y alcanzar un medio de menor densidad, se refleja en la roca como una onda de tracción. Debido a que la resistencia de rotura a tracción de la roca es

del orden de 5 a 10 veces inferior a su resistencia a compresión, se produce la fragmentación del material entre el barreno y la cara libre.

10.2 ENERGÍA DE GASES

A este primer fenómeno de choque le sigue la expansión de los gases de detonación. Estos gases se expanden dentro de las fracturas de la roca provocando el desplazamiento del material.

La existencia de caras libres es por tanto fundamental para poder fragmentar correctamente la roca. En la mayoría de aplicaciones es necesario comenzar la secuencia por aquellos barrenos adyacentes a una o más caras libres.



Figura 46: Reflexión de las ondas en la cara libre del frente del banco

La secuenciación de la pega mejora la fragmentación si permite que los primeros barrenos en detonar vayan abriendo sucesivas caras libres a los barrenos que irán detonando inmediatamente después. En barrenos con diferentes cargas secuenciadas en columna, se hace necesario que la carga superior detone en primer lugar para crear una nueva cara libre a la carga inmediatamente por debajo.



Expansión de los gases de detonación y proyección de la roca

Figura 47: Expansión de los gases de detonación y proyección de la roca

11. FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO DEL EXPLOSIVO

Los factores que afectan al rendimiento son el grado de acoplamiento, la carga lineal, la impedancia característica y el diámetro de carga.

11.1 GRADO DE ACOPLAMIENTO

El trabajo potencial del explosivo es función directa del calor total de explosión. Sin embargo, la forma en que se emplea esta energía depende de cómo se carga el explosivo en el barreno.

La utilización máxima de esta energía se produce cuando el explosivo llena por completo el volumen del barreno. Esto se da en la carga de explosivos a granel. De no ser así, la cámara de aire entre explosivo y barreno reduce sensiblemente la presión de detonación efectiva.

Este parámetro se puede expresar como el porcentaje de la sección transversal del barreno que queda cargada.

11.2 CARGA LINEAL

Se refiere a la carga de explosivo por metro lineal de barreno. Es una medida de concentración de energía en el barreno.

Depende de la densidad del explosivo, la profundidad del barreno (en explosivos compresibles, sensibilizados con gas), el diámetro de la carga y la presencia de agua en el barreno.

11.3 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA

Es el producto de la velocidad de detonación por la densidad del explosivo. Explosivos que tienen una impedancia característica superior a la impedancia de la roca transfieren más energía. La impedancia de la roca es el producto de su densidad por su velocidad sísmica (V_p).

11.4 DIÁMETRO DE CARGA

La velocidad de detonación del explosivo se incrementa con el diámetro de la carga hasta un valor óptimo. También afecta, al grado de acoplamiento y a la carga lineal.

12. DISEÑO DE LA VOLADURA

Los requerimientos de cualquier diseño de voladura deben cumplir son, por este orden estricto:

- Ser seguro.
- Garantizar resultados óptimos para las condiciones de operaciones existentes.
- Proporcionar una flexibilidad adecuada.
- Ser sencillo en la práctica.

Se debe llegar a un balance entre el diseño de la perforación, la selección adecuada del explosivo y la secuenciación de cargas para producir la correcta fragmentación del material.

12.1 GEOMETRÍA DE LA VOLADURA

La geometría de la voladura se define mediante la determinación de los siguientes parámetros:

- Altura del frente;
- Posición de los barrenos;
- Longitud de cada barreno;
- Sobreperforación;
- Diámetro de perforación;
- Azimut (o dirección de la perforación);
- Inclinación;
- Malla de perforación

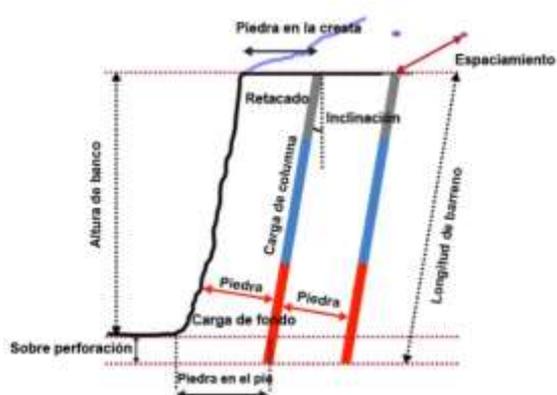


Figura 48: Esquema de los parámetros geométricos de diseño de una voladura en banco

12.2 ALTURA DE BANCO

La altura de banco viene determinada por la morfología del yacimiento y por restricciones de seguridad. Las alturas de banco entre 10 y 15 metros se consideran las más económicas de operar y menos peligrosas. Por encima de esta altura, la pila de material podría ser más alta que el óptimo de la máquina de carga y el frente de difícil acceso para su saneo posterior.

La altura afecta al resultado de la voladura de diferentes formas. Si la altura de banco no es suficientemente grande, no se puede alcanzar la piedra y el espaciamiento óptimos. Se recomienda que la columna de

carga sea de una longitud al menos doble que la piedra. Si los barrenos son demasiado cortos, la carga no se puede distribuir de manera correcta sin reducir la malla de perforación y el diámetro.

Frentes muy altos aumentan la probabilidad de errores de desviación en la perforación. La estabilidad del frente puede ser también un problema considerable.

12.3 DIAMETRO DE PERFORACIÓN

Un diámetro reducido de perforación permite una malla más cerrada que distribuye la carga de manera más uniforme. Esto incrementa el coste de perforación por metro cúbico, pero puede ser la única manera de operar en ciertas condiciones.

Cuando existen bolos de material duro embebidos en una matriz de material más blando, sólo se puede alcanzar una fragmentación aceptable si se atraviesa cada estrato con un barreno, esto requerirá una malla más cerrada de barrenos de menor diámetro.

Cuando se incrementa el diámetro de perforación, una malla más abierta genera normalmente una fragmentación más gruesa reduciendo el coste de perforación por metro cúbico.

En rocas que muestran una alta densidad de fisuras, la fragmentación viene regida en gran medida por la estructura de la roca y un aumento en la malla y el diámetro tendrá menos influencia. Una roca con esta estructura requerirá, en general, un menor consumo específico de explosivo.

Cuando se usan mezclas de ANFO/emulsión a granel, se hace un uso más eficiente de la perforación ya que el explosivo ocupa todo

el volumen de barreno. Además, el explosivo trabaja sensiblemente mejor en diámetros mayores. En este caso se puede optimizar mejor el coste de perforación por metro cúbico.

Para cada explosivo hay un límite por encima del cual no se obtienen mejoras de rendimiento en la perforación al incrementar el diámetro.

12.4 PIEDRA (B)

Existen muchas fórmulas complejas que pretenden calcular la piedra óptima para unas condiciones dadas de diámetro de perforación, tipo de material y tipo de explosivo. Dada la complejidad de los mecanismos de rotura y la influencia tan alta en los resultados de las condiciones geológicas del macizo, no se puede esperar que ninguna expresión matemática proporcione valores exactos para un caso concreto.

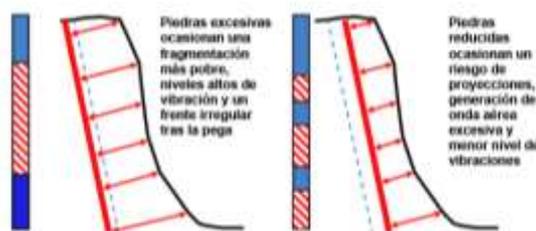


Figura 49: consecuencias posibles de piedras incorrectas en la voladura

Es más razonable establecer la piedra de diseño en cada condición de voladura como el resultado de un proceso de prueba y error. Se necesita, sin embargo, un punto lógico de partida para comenzar este proceso. Éste se puede establecer a partir de la siguiente simple ecuación:

$$B = (30 \text{ a } 45) * D/1000$$

Donde la piedra, B, viene expresada en metros y el diámetro, D, en milímetros.

Esta ecuación abarca desde rocas duras a blandas con una cierta fragmentación natural y el explosivo de fondo usado tiene las características de una emulsión con alto grado de acoplamiento.

Diámetro	Factor	30 Dura	35 Media	40 Blanda	45 Muy Blanda
90m m		2.7	3.1	3.6	4.0
105m m		3.1	3.6	4.2	4.7
115m m		3.4	4.0	4.6	5.2
127m m		3.8	4.4	5.1	5.7
152m m		4.6	5.3	6.1	6.8
200m m		6.0	7.0	8.0	9.0

Figura 50: Tabla de selección del parámetro de diseño de la piedra en función del diámetro de perforación y la dureza del material

12.5 ESPACIAMIENTO (S)

El espaciamiento debe ser entre 1 y 1,25 veces la piedra para una mejor fragmentación más uniforme.

Unos espaciamientos excesivos producen un frente irregular y la fragmentación contendrá una proporción más alta tanto de finos como de sobretamaños.

12.6 ESQUEMA DE PERFORACIÓN

Los esquemas a tresbolillo proporcionan una repartición geométrica más uniforme de la energía del explosivo en el macizo.

12.7 INCLINACIÓN DEL BARRENO

La inclinación del barreno permite un uso más efectivo de la energía del explosivo en el pie del banco y en la zona del retacado ya que hay una mayor proporción de carga que se orienta hacia la cara libre.

Por lo tanto, la calidad de la voladura en el pie es mejor; se mejora la fragmentación en la zona del retacado; mejora la calidad del

frente tras la voladura y las vibraciones se reducen al disminuir la cantidad de energía que se disipa en el pie del barreno contra el terreno.

El desplazamiento de la pila de material es mayor al proporcionar un mayor ángulo de salida. Sin embargo, la perforación inclinada es más compleja a medida que se incrementa el ángulo y favorece la desviación de los barrenos.

Estas ventajas de una perforación inclinada son muy importantes en voladuras en cantera en banco; pero desaparecen o son sustancialmente menores en voladuras de mina a cielo abierto, con diámetros grandes y alturas de banco de 8 o 10m, por lo que, en estos casos, la perforación se hace totalmente vertical.

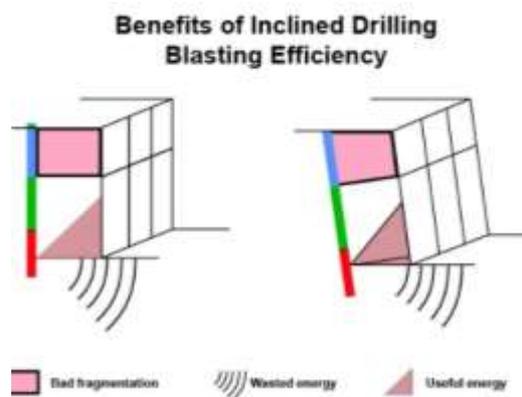


Figura 51: Aprovechamiento de la energía del explosivo en barrenos inclinados

12.8 SOBUPERFORACIÓN

Para reducir los repiés tras la voladura, los barrenos se perforan a una cierta profundidad por debajo del pie del banco, hasta un máximo de un tercio de la piedra.

El explosivo situado por encima y por debajo del pie del banco afecta a la fragmentación de la roca en el pie del



banco, pero, a distancias mayores de un tercio de la piedra, este efecto es mínimo.

12.9 LONGITUD DEL BARRENO

La longitud del barreno depende de la altura del banco, la sobreperforación y el ángulo de inclinación.

$$\begin{aligned} & \textit{Longitud de barreno} \\ &= (\textit{altura de banco} \\ &+ \textit{sobreperforación}) \\ &/ \cos(\textit{ángulo de inclinación}) \end{aligned}$$

12.10 CARGA DE FONDO

La carga explosiva en el fondo del barreno necesita desarrollar un trabajo mecánico muy grande para fragmentar el material y formar un nuevo pie de banco. Se requiere alrededor del triple de energía en el fondo del barreno que en la columna.

La carga de fondo se puede incrementar hasta que el explosivo está tan lejos de la base que ya no desarrolla ningún trabajo útil en el pie. Este punto se alcanza cuando la carga de fondo tiene una altura igual a la piedra.

$$\begin{aligned} & \textit{Altura máxima de la carga de fondo} \\ &= 1,3 * B \end{aligned}$$

En cada caso concreto, la práctica podrá demostrar que se requiere una longitud de carga de fondo menor. De nuevo, el diseño más favorable para cada voladura tipo en una explotación dependerá de un proceso racional de prueba y error en el que se controlen correctamente todos los parámetros de diseño y los resultados.

12.11 RETACADO

Para minimizar el riesgo de proyecciones y mantener la carga confinada en el barreno,

la longitud del retacado se debe mantener siempre que sea posible por encima de veinticinco veces el diámetro de perforación. Un retacado demasiado corto tiende a producir una rotura excesiva y un frente irregular.

Antes de definir una longitud de retacado se necesita examinar los perfiles de cada barreno y tener en consideración factores como la piedra real, el tipo de roca, el material de retacado, tipo de explosivo y el método de iniciación.

Se debe tener especial cuidado al usar cámaras de aire para reemplazar parte del material del retacado. Esta práctica es efectiva para mejorar la fragmentación en la zona del retacado, pero se debe poner en práctica de forma progresiva y examinando filmaciones de cada voladura. Los riesgos se deben evaluar al detalle y la zona de riesgo de la voladura debe de ser replanteada.

El material de retacado que proporciona un resultado óptimo es una gravilla angulosa de un tamaño medio de 15 mm.

Existen tapones especiales que se alojan entre la carga de columna y el retacado. Pueden ayudar a contener los gases dentro del barreno durante más tiempo y potenciar el efecto del retacado.

12.12 CARGA DE COLUMNA

Es la carga de explosivo entre la carga de fondo y el retacado final. La concentración lineal de carga es menor que en el fondo del barreno. Por su rendimiento en la expansión y desplazamiento del material, el ANFO es la carga de columna idónea en la mayoría de aplicaciones con barrenos secos. En caso de que los barrenos estén inundados, se debe recurrir a explosivos



encartuchados resistentes al agua o a mezclas a granel de emulsión / ANFO.

12.13 USO DE MEZCLAS A GRANEL EMULSIÓN/ANFO

Estos productos, debido a su naturaleza, permiten incrementar el contenido de energía por barreno hasta en un 45%. La energía por volumen es claramente superior al ANFO debido a la mayor densidad. Si bien esta energía por volumen es menor que la de los productos que se usan tradicionalmente como carga de fondo, el grado de acoplamiento de estas mezclas a granel es mayor y se mejora la eficiencia de la voladura en el pie del banco.

Las mezclas con alta proporción de emulsión sensibilizada con gas presentan un progresivo aumento de la densidad con la profundidad en el barreno. Esto hace que su energía por volumen sea mayor en el fondo del barreno que en la parte superior y también reducen su sensibilidad.

Cuando un barreno se carga con una mezcla a granel de emulsión y ANFO, puede contener hasta un 50% más de explosivo y hasta un 45% de energía por volumen. Como resultado de esto, generalmente los valores de piedra y espaciamento pueden incrementarse en comparación con los valores calculados por la fórmula usada previamente.

El aumento de la malla de perforación es dependiente de las condiciones geológicas locales y del tipo de voladura, obteniéndose cifras del 30% - 50%. Como consecuencia, el consumo específico es ligeramente superior que en el caso de carga tradicional, pero la perforación específica (metro lineal perforado / metro cúbico volado) es sensiblemente inferior. El conjunto de la

operación perforación y voladura es, de manera general, más eficiente en términos económicos.

Estas mezclas a granel se deben iniciar con un multiplicador de TNT o PETN de potencia suficiente. De manera general se usan multiplicadores de al menos 500g de masa en el cebo cercano al fondo del barreno (donde la emulsión está más comprimida y es menos sensible). El cebo de seguridad, situado a unos pocos metros por debajo del retacado, se puede componer de un multiplicador de menor masa, normalmente no inferior a 250g.

No es recomendable utilizar cordón detonante con este tipo de productos. La detonación lateral que produce no es suficiente para iniciarlos, pero sí para dañarlos, destruyendo una porción importante del explosivo del barreno.

12.14 MÉTODO DE DETONACIÓN

Por motivos de seguridad, eficiencia ambiental y calidad de resultados, se recomienda siempre la iniciación en barreno en detrimento de la iniciación en superficie.

12.15 POSICIÓN DEL CEBO

El detonador y el cartucho cebo se deben introducir en el barreno apuntando siempre hacia arriba, es decir, hacia la dirección de progresión de la detonación. Los multiplicadores tienen orificios dispuestos para que esta operación se realice de forma sencilla.

Estudios en mecánica de rocas han determinado que la posición del cebo tiene influencia directa en la amplitud y la forma de la onda de tensión generada. Dado que la velocidad de detonación, parámetro que

determina el poder rompedor del explosivo, se incrementa sustancialmente con el confinamiento, la mejor localización para el cebo es a nivel del pie de banco.

Esto requiere unas buenas condiciones de carga en el barreno para poder dejar caer dos cartuchos que rellenen la sobreperforación, sin miedo a que éstos puedan quedar bloqueando el barreno o atrapados en el fondo sin continuidad con el cebo. Un buen registro de perforación debe ayudar a conocer mejor estas condiciones y reducir este riesgo. Además, se debe conocer de forma precisa la posición del pie de banco para cada barreno.

12.16 SECUENCIA DE DISPARO. CARGA OPERANTE (MIC)

Tiene influencia directa en el nivel de vibración generado. Puede estar restringida a valores muy reducidos para poder acomodar las operaciones de perforación y voladura a zonas próximas a núcleos urbanos u otras zonas sensibles.

Se define como la carga máxima de explosivo que detona de manera instantánea durante una voladura. A efectos de cálculo, cuando se usan sistemas de iniciación convencionales (eléctricos o no eléctricos), se considera como carga instantánea a todo conjunto de cargas que detonan en un intervalo menor o igual a 8ms. Esto se debe a la ausencia de precisión suficiente en este tipo de sistemas.

Normalmente, voladuras en banco no muy complejas se pueden secuenciar en superficie con sistemas no eléctricos de manera que los barrenos detonen secuenciados entre sí en tiempos superiores a 8ms. En este caso, la MIC será la carga total del barreno.



Figura 52: Disposición de carga y secuenciación en barrenos con cargas partidas

En ocasiones, las restricciones ambientales son grandes, siendo necesario dividir la carga dentro del barreno con retacados intermedios y secuenciar estas cargas entre sí de manera apropiada.

12.17 DIRECCIÓN DE LA VOLADURA

Esta dirección se define mediante el diseño de la secuencia de disparo. Igualmente se modifican así las piedras y espaciamientos efectivos.

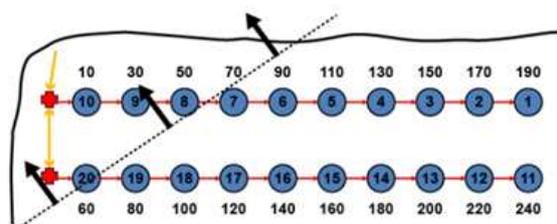


Figura 53: Dirección de la salida de la voladura mediante secuenciación de los barrenos

12.18 SELECCIÓN DE LA SECUENCIA DE DISPARO

La seguridad y los resultados de una voladura se ven afectados por el orden y el tiempo en el que se inician los barrenos unos respecto a otros. Una selección de tiempos inadecuados puede provocar poco movimiento si se usan tiempos muy reducidos o problemas de corte de voladuras y proyecciones si se usa un tiempo excesivo entre barrenos. Una

combinación ideal de secuencia y tiempos ayuda a obtener una óptima fragmentación y, como consecuencia, un menor nivel de vibración.

Los tiempos entre barrenos de una misma fila deben estar entre 5 – 10 ms por metro de espaciamiento como regla general para generar una fragmentación óptima. Los tiempos entre filas se deben estar entre 10 – 30 ms por metro de piedra. Se tiene que tener en cuenta la competencia y dureza del material. Los materiales ígneos de gran dureza deberán moverse en los valores más reducidos mientras que las rocas sedimentarias de menor dureza podrán tener unos retardos mayores. El terreno más fracturado reacciona con mayor velocidad usando tiempos menores.

A la hora de elegir una determinada secuencia es necesario identificar las caras libres disponibles. El primer barreno en detonar debe ser aquel que tenga mejor salida a estas caras libres y una piedra media más reducida (en el rango de diseño seguro).

Los tiempos entre barrenos y filas se determinan en base a las piedras y espaciamientos reales según el rango anterior de valores. Sin realizar ensayos es imposible determinar el tiempo exacto óptimo para cada caso concreto y se hace necesario un cierto proceso de prueba y error hasta encontrar la combinación óptima de tiempos. Al trabajar con detonadores no eléctricos, la disponibilidad de los tiempos está limitada por la serie de retardos disponibles en los conectores de superficie. Los detonadores electrónicos permiten seleccionar cualquier tiempo con incrementos de milisegundo.

Por motivos de seguridad, la secuenciación con detonadores no eléctricos se debe

concebir de manera tal que la voladura no interrumpa en caso del fallo de un conector de superficie. Se trata de evitar que el barreno fallido sea sepultado por el material volado del resto de la pega.

Esto supondría una situación de mucho riesgo durante la posterior etapa de carga del material ya que habría cebos con detonadores sin detonar en la pila de escombros. Si, por el contrario, la pega se interrumpe en el conector fallido, cabe la posibilidad de cambiar el conector y disparar de nuevo. Es una situación no exenta de riesgo y se necesita reevaluar la zona de peligro de la voladura ya que puede haber barrenos descabezados y las piedras pueden ser demasiado reducidas.

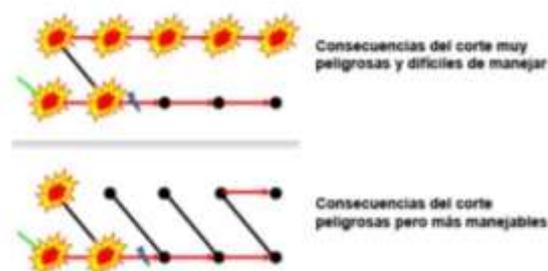


Figura 54: Selección de una secuencia de disparo que reduce el riesgo de consecuencias de un corte

12.19 PIEDRAS EXCESIVAS O REDUCIDAS

En ocasiones es necesario enfrentarse a perfiles de barrenos que muestran una piedra muy variable, con grandes barrigas en la mitad inferior del frente o pronunciadas entradas a media altura. Esto puede haber sido consecuencia de que las operaciones previas de voladura o de arranque con maquinaria dejaron un frente muy irregular. Los perfiles y la forma del frente se deben tener especialmente en

cuenta para hacer frente a esta situación. Se presentan cuatro líneas de actuación:

- **Variar el tipo de explosivo.** Si existe una piedra excesiva en la zona del pie del banco, se debe optar por un explosivo de mayor energía volumétrica, con alta velocidad de detonación.
- **Variar el diámetro de explosivo.** Si el perfil muestra una piedra reducida pero tolerable, dentro de los límites de seguridad definidos en la especificación de la voladura, se puede optar por buscar un mayor desacoplamiento de la carga, usando unos cartuchos de menor diámetro. En ocasiones, esto puede ser complicado de poner en práctica con explosivos a granel.
- **Retacados intermedios.** Otra forma de rebajar la concentración de carga lineal es haciendo uso de retacados intermedios que dividen la carga. La longitud de cada carga partida debe ser inferior a la longitud de la piedra frente al barreno. Normalmente las cargas se detonan todas simultáneamente, haciendo uso de un cebo en la carga de fondo que inicia una línea de cordón detonante a lo largo del barreno (10g/m – 40 g/m). Para evitar el daño al retacado, la línea de cordón se debe cortar y encintar a los tubos o cables de los detonadores por debajo de la profundidad del retacado final. La operación con mezclas a granel de emulsión / ANFO requerirían el uso de un cebo por cada carga.
- **Exclusión total del explosivo.** Tras inspeccionar los perfiles, algunas zonas del barreno pueden quedar demasiado cerca del frente. Si se cargan estos barrenos, el riesgo de proyecciones incontroladas es muy elevado. En esas zonas el explosivo se sustituye por material de retacado inerte.

Esta consideración es también válida al cargar barrenos en terreno muy

fragmentado o que atraviesan alguna cavidad. En este caso, la cavidad se sella para evitar su llenado con explosivo. Para ello se usará suficiente material inerte de retacado.

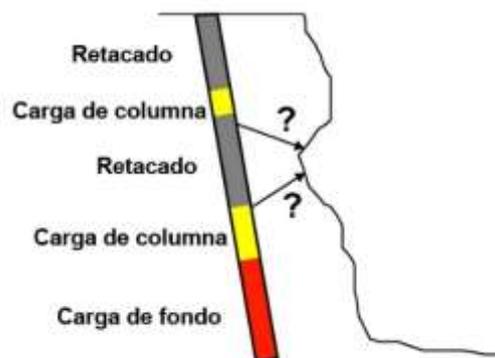


Figura 55: Uso de un retacado intermedio para evitar una piedra reducida en el perfil del banco

En ningún caso se podrá sustituir el material inerte de retacado por cámaras de aire en estas situaciones ya que la expansión de los gases de detonación puede provocar su escape a través de las grietas y fisuras hacia la cara libre.

Otro problema lo pueden ocasionar las vetas de arcilla débil presente entre las capas competentes de la estratificación. Para evitar proyecciones de material a través de estas vetas, el retacado intermedio se debe añadir en las zonas del barreno que las atraviesan. Deben dejarse sin cargar 0,3 veces la distancia de la piedra por encima y por debajo de la zona de debilidad si la piedra al frente es la correcta en esa zona.

Estas anomalías geológicas se deberán registrar debidamente durante la perforación, quedando patentes en el informe de perforación por barreno, documento indispensable de la especificación de voladura.

12.20 CONSUMO ESPECÍFICO

El tipo de roca y el tipo de operación determinan la cantidad de explosivo necesaria para obtener una fragmentación efectiva.

En voladuras en cantera, este consumo específico suele estar entre 0,3 – 0,5 kg/m³ en materiales duros y competentes como granito o cuarcita. En materiales más blandos y más fracturados de manera natural, el consumo específico está entorno de 0,14 – 0,25 kg/m³.

Una manera alternativa de expresar este consumo es mediante el ratio de voladura que expresa las toneladas voladas de roca por cada kg de explosivo. Este valor suele estar entre 4,5 – 7,0 T/kg.

12.21 RETACADOS INTERMEDIOS PARA REDUCIR LAS VIBRACIONES

En determinadas condiciones de proximidad a áreas habitadas u otras estructuras, la carga operante requerida para generar un nivel tolerable de vibración puede llegar a ser menor que la carga explosiva que contendría un solo barreno. Cuando sucede esto, se hace necesario dividir la carga del mismo en cargas más pequeñas, normalmente en dos o tres, y dispararlas de manera secuenciada entre sí. Se deben tener en cuenta lo siguiente:

- El retacado intermedio debe ser de una longitud de al menos 12 veces el diámetro de perforación para evitar, bien la detonación por simpatía de explosivos sensibilizados con NG, o bien la muerte por presión de explosivos tipo emulsión o gel.
- Las cargas superiores se disparan en primer lugar para abrir nuevas caras libres a las caras inmediatamente debajo. De este

modo se pretende mejorar la fragmentación y reducir la vibración.

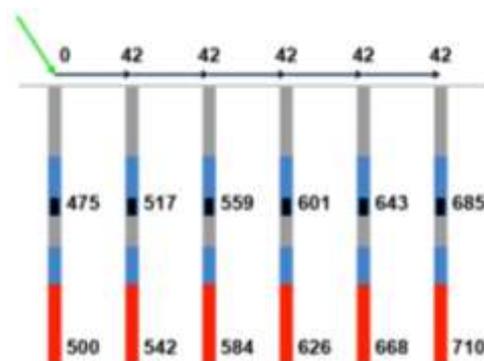


Figura 56: Esquema de secuenciación de una pega con cargas partidas, usando detonadores en fondo (475/500) y conectores en superficie de 42 ms.

Cuando se trabaja con detonadores no eléctricos, se recomienda que cada carga de explosivo lleve un cebo con dos detonadores alojados en su interior por motivos de seguridad. En este caso, existe la limitación de los retardos de fondo disponibles. La secuenciación entre cargas de un mismo barreno se hace entonces usando detonadores de fondo de diferente retardo en cada una de ellas. Tiempos mayores entre cargas podrían ocasionar proyecciones. La dispersión de tiempos en estos retardos largos es mayor que en retardos cortos y existe la posibilidad razonable de sufrir un solape de cargas en menos de 8ms.

Se recomienda, en cualquier caso, usar detonadores electrónicos para asegurar unos retardos determinados entre cargas.

13. TAQUEO DE BLOQUES

En ocasiones se hace necesario trocear bloques de tamaño excesivo, resultantes o no de una voladura anterior. Es necesario cerciorarse de que el bloque no proviene de

un barreno fallido y puede contener restos de explosivo o detonadores.

Una práctica muy común, segura y efectiva es el empleo de martillos hidráulicos. Estos bloques también se pueden fragmentar mediante dos técnicas diferentes de voladura:

- **Perforación de un barreno en el bloque.**

Esta práctica es una fuente frecuente de proyecciones incontroladas y sólo se puede llevar a cabo en zonas aisladas. Se hace necesaria una evaluación del riesgo existente que debe incluir el replanteo de la zona de peligro de la voladura. Es necesario estimar de manera lo más fiable posible el volumen del bloque para evitar sobrecargas de explosivo.

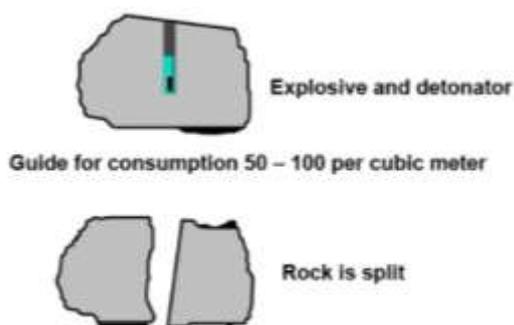


Figura 57: Taqueo de un bloque mediano mediante el disparo de un barreno de diámetro reducido.

Se perfora un barreno lo más centrado posible en el volumen del barreno hacia el centro del mismo. Es recomendable usar barrenos de poco diámetro. La carga específica debe estar entre 50 y 100 g/m³. El explosivo a usar debe ser una dinamita en calibre reducido (26mm - 32 mm). En caso de usar un cartucho de 26mm, la piedra al barreno no de exceder de los 700mm, mientras que en caso de usar un cartucho de 32mm, la piedra debe ser de aproximadamente 1m.

Los bloques de gran volumen podrán requerir la perforación de más de un barreno. Estos se perforarán con un espaciado de 1,2 veces la piedra y se dispararán de manera simultánea, salvo que el volumen del bloque sea tal que requiera la perforación de una malla de barrenos con diferentes filas. En este caso se usará un retardo mínimo entre barrenos.

Todos los barrenos se deben retacar hasta la boca con material apropiado siendo esta práctica muy ruidosa.

- **Parche explosivo alojado al bloque.** Es una práctica muy efectiva pero extremadamente ruidosa. Sólo se debe llevar a cabo en zonas aisladas y tras haber evaluado los riesgos de manera apropiada. Aunque no suele generar proyecciones, estas siempre se deben considerar como posibles y la zona de peligro considerada debe ser replanteada.

La técnica consiste en adosar una carga explosiva al bloque, preferiblemente de dinamita, y hacerla detonar al aire. La carga específica debe ser de unos 250 g/m³ y debe estar en perfecto contacto con el bloque para producir resultados satisfactorios.

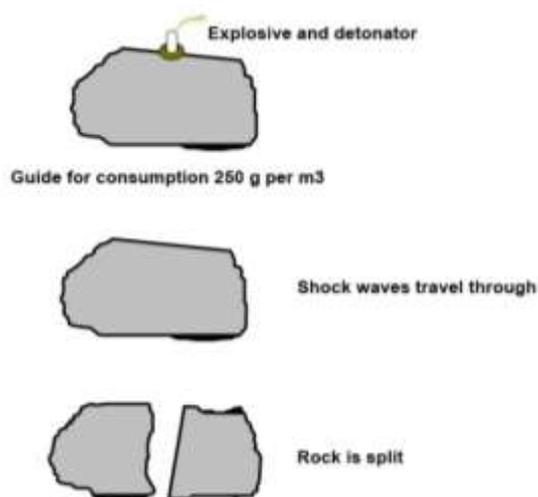


Figura 58: Taqueo de un bloque mediante un parche explosivo adosado al mismo



14. FRENTE ESTABLE TRAS LA VOLADURA

El estado del frente después de la voladura depende de una serie de factores controlables en mayor o menor grado:

- **Estratificación y fracturación natural del macizo.** Tanto el espesor de la estratificación como la orientación de ésta y la disposición y ángulo de las fracturas naturales juegan un papel relevante sobre la calidad del frente tras la voladura. La única medida posible es variar la dirección de la voladura, cambiar el ángulo de perforación o alterar la perforación para que se acomode a los espacios entre fracturas.
- **Variación de la dureza de la roca.** Varía el tipo de explosivo que puede ayudar, pero no siempre es efectivo.
- **Diámetro del barreno.** Tiene influencia directa en la cantidad de piedra tolerable frente a cada barreno.
- **Profundidad de retacado y tipo de material en el retacado.** Un retacado insuficiente provocará cráteres e incluso proyecciones peligrosas, mientras que un retacado excesivo provocará bloques colgados en el frente. El material de retacado más efectivo es una gravilla de un tamaño medio de 15mm y de bordes angulares.
- **Piedra y consumo específico.** Un consumo específico irrealmente bajo o una piedra de diseño insuficiente crearán un frente en mal estado que requerirá operaciones intensivas de saneo del mismo.
- **Tipo de explosivo junto al retacado.** El ANFO, debido a su bajo poder rompedor, puede ser propenso a dejar bloques colgados en determinadas condiciones. La solución puede pasar por alojar un cartucho de dinamita debidamente cebado inmediatamente debajo del retacado.

Otra solución es considerar una ligera reducción de la longitud de retacado o usar una pequeña cámara de aire entre explosivo y el retacado. Se deben evaluar los riesgos de manera debida y tomar siempre las precauciones necesarias para evitar proyecciones peligrosas.

En ocasiones se puede usar un cartucho de dinamita de pequeño calibre dentro del retacado. Este cartucho debe ser debidamente cebado. La integridad del retacado se puede ver comprometida por lo que los riesgos de esta práctica se deben evaluar de manera adecuada.

También existe la posibilidad de perforar algunos barrenos cortos de ayuda entre la malla de voladura. Estos barrenos deben ser de una profundidad ligeramente superior a la longitud del retacado y llevar una pequeña carga de explosivo encartuchado de pequeño diámetro que debe quedar bien retacado.

- **Ángulo de perforación.** Cuanto mayor es la inclinación, mejor es la calidad del frente final. También lo es la rotura en el pie del banco y el desplazamiento de la pila de escombros.

En la práctica, el ángulo de perforación se ve limitado por la dificultad de la perforación en sí, la probabilidad de obtener barrenos de mayor desviación y la dificultad posible de cargar el explosivo en barrenos muy tendidos.

El ángulo de perforación, en la práctica, suele variar entre 12º y 18º de manera general. Siendo estos valores suficientes para la mayoría de los casos.

15. VOLADURAS DE CONTORNO

Puede ser necesario dejar un talud final perfectamente sano tras la voladura de banco principal. Existen dos técnicas.



Figura 59: Talud final tras una pega de precorte

15.1 PERFORACIÓN DE BARRENOS VACÍOS

Se trata de perforar una línea de barrenos vacíos que rodean la zona de voladura principal y delimitan el talud final que quedará tras la voladura. Los barrenos se deben perforar con precisión, preferiblemente con máquinas de martillo en fondo.

Estos barrenos no llevarán carga alguna durante la pega y se pueden perforar a cualquier diámetro normal de producción, normalmente entre 76mm y 110mm. El espaciamiento entre barrenos debe de ser entre 2 y 5 veces el diámetro de perforación, en función de las condiciones del terreno.

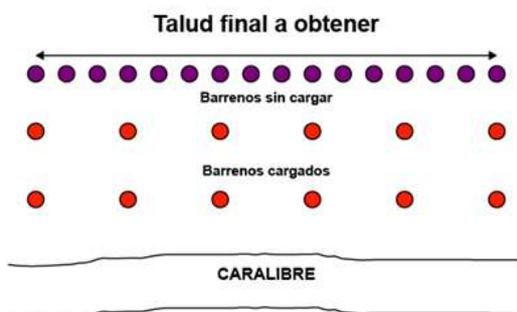


Figura 60: Barrenos vacíos

Los barrenos de la voladura se perforan a la piedra y el espaciamiento normal, por

delante del talud final. Se debe evitar que ningún barreno quede a una distancia menor de 10 veces el diámetro de perforación para no dañar el talud final.

La voladura se dispara con las cargas y retardos habituales. El efecto de la voladura en la roca, además de fragmentar y desplazar el material hacia el frente, generará unas grietas de rotura entre los barrenos vacíos que crearán un talud final en buenas condiciones.

15.2 PRECORTE

Consiste en perforar, detrás de los barrenos de la voladura de producción, una línea de barrenos que determinan la forma del talud final. Estos barrenos se perforan a espaciamiento reducido, llevando una carga lineal muy liviana y detonándose todos de retardo simultáneo para facilitar el efecto de corte entre ellos.

Los barrenos de precorte se perforan en diámetros de entre 65mm y 89mm en frentes de hasta 15m de altura. La distancia entre centros es de 8 a 12 veces el diámetro de perforación. De manera genérica se espacian entre sí 1 metro para conseguir buenos resultados.

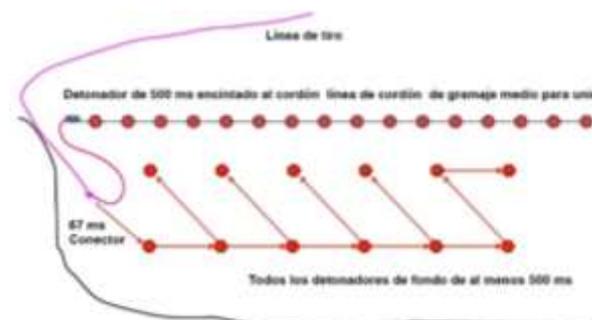


Figura 61: Esquema de precorte

La forma más sencilla y eficaz de cargar estos barrenos de precorte es con cordón detonante de alto gramaje (70 g/m a 100

g/m). Estas líneas se cortan a unos 20 centímetros del emboquille y se encintan en superficie a una maestra de cordón de gramaje medio (12 g/m) a la que se le da fuego con un detonador en superficie.

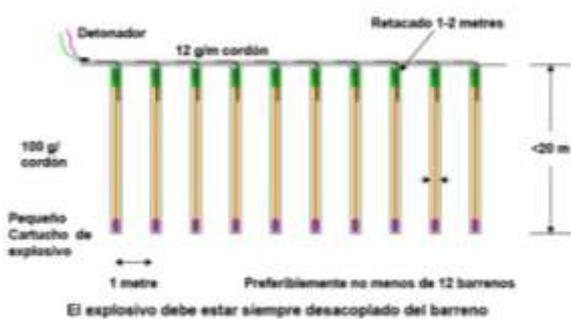


Figura 62: Carga de barrenos de precorte con cordón detonante

Es también posible conseguir una carga lineal reducida usando cartuchos de emulsión de poco gramaje espaciados entre sí dentro del barreno.

La línea de precorte debe dispararse 50ms antes que la voladura principal. Los barrenos de la pega adyacentes a la línea de precorte deben perforarse paralelos al talud final y a una distancia no inferior a 2/3 de la piedra normal de diseño.

Cuando se procede de esta manera, la línea de precorte previene al talud final de los daños normales de rotura hacia atrás de la voladura y provoca una rotura limpia entre barrenos, generando un talud final de muy buena calidad.

16. PREVENCIÓN DE PROYECCIONES

Hay muchas circunstancias de generación de proyecciones en una voladura. Cualquier proyección se debe siempre a la presencia de demasiado explosivo cerca de una cara libre en el momento en que detona. Esto provoca que los gases liberados a la atmósfera a gran presión proyecten

fragmentos de roca de tamaño variable a grandes distancias.

Con objeto de evaluar el riesgo potencial de proyecciones es absolutamente necesario examinar con cuidado, de manera visual y con ayuda de los instrumentos electrónicos apropiados, la situación de las cargas presentes en la voladura respecto a la cara libre más cercana. Esta evaluación se debe hacer a medida que se calculan las cargas con toda la información disponible en la especificación de la voladura.



Figura 63: Proyecciones en una voladura en banco

Las principales causas de proyecciones en una voladura tienen su origen en errores en la perforación y en problemas durante la carga.

16.1 ERRORES EN LA PERFORACIÓN

Los diferentes errores posibles en la perforación (emboquille, dirección, etc.) pueden provocar que uno o varios barrenos queden demasiado cerca de una cara libre.

También pueden provocar que dos barrenos tengan un espaciado demasiado estrecho en el pie del banco y la concentración de carga sea excesiva.

El control de la calidad de la perforación con sonda electrónica y su integración en un

modelo en 3D del frente se hace imprescindible para garantizar un diseño seguro de voladura.

- Errores de perforación
 - Posición incorrecta de la perforadora
 - Desviación durante la perforación
 - Resulta en piedras reducidas o en la concentración de carga excesiva en el pie

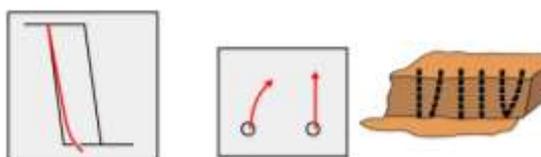


Figura 64: errores de perforación que pueden degenerar en proyecciones peligrosas de material

16.2 PROBLEMAS DURANTE LA CARGA

Una excesiva concentración de carga en el frente puede dar lugar a proyecciones peligrosas. Esto puede suceder en el caso de rellenar cavidades con explosivos a granel.

Las vetas de arcilla entre estratos de roca competente pueden ser una vía de escape fácil para los gases de la detonación que pueden proyectar fragmentos de mayor o menor dureza a grandes distancias.

Se debe prestar especial atención a los partes de perforación durante el diseño de la carga por barreno. Estos deben mostrar con precisión este tipo de anomalías. Existe la posibilidad de generar proyecciones peligrosas desde la zona del retacado cuando el barreno se ha sobrecargado de manera accidental. En este caso se debe retirar el explosivo de la zona del retacado hasta lograr una profundidad de retacado segura.

Para retirar cartuchos de la zona del retacado es necesario disponer de un

atacador con un accesorio especial en forma de sacacorchos en el extremo.

Las mezclas a granel de emulsión / ANFO a granel se pueden soplar con aire comprimido fuera del barreno mediante una manguera de material antiestático.

Una forma de proceder con el ANFO cargado a granel es retirar el primer medio metro aproximadamente con las manos y después verter agua en abundancia sobre el barreno para disolver la máxima cantidad de explosivo posible. Una vez hecho esto, se retaca el barreno en la medida de lo posible. Se debe anotar esta incidencia en el parte de carga. Se deben evaluar los riesgos en cada caso concreto y expandir los límites de la zona de peligro en caso necesario.

El esquema de disparo y la secuenciación pueden ser una causa de proyecciones. Tiempos demasiado largos pueden dejar muy expuesta una carga a la hora de detonar y provocar proyecciones.

El disparo de zapateras y barrenos para corregir la geometría del frente son también una causa frecuente de proyecciones. La distancia disponible a las caras libres y la carga a emplear se deben evaluar de manera precisa, a ser posible, haciendo uso de herramientas como un perfilómetro 3D.



Figura 65: Proyecciones generadas por el disparo de un barreno corto en el pie del banco



En todas las situaciones en las que es posible la generación de proyecciones, se hace necesaria una inspección visual del terreno para determinar zonas más fragmentadas en el frente o en las caras libres.

Se debe hacer uso de los partes de perforación y tomar medidas de la geometría de las caras libres disponibles mediante el uso de un perfilómetro láser o la fotogrametría mediante dron.

Se recomienda la evaluación del potencial de proyecciones en un frente en función de los resultados obtenidos en una voladura. Una manera de llevar esto a cabo es evaluar la distancia máxima a la que llegan los fragmentos de roca en una voladura. Normalmente, los fragmentos deben llegar como máximo a una distancia no superior a tres veces la altura del frente. Existen tres posibilidades de proyecciones:

- **Existencia de proyecciones cercanas.** Algunas fuera de la zona normal de caída (3 veces la altura del banco): Se deben considerar medidas correctoras en este caso.
- **Existencia de proyecciones alejadas.** Existen muchos fragmentos fuera de la zona normal pero dentro de la zona de peligro de la voladura: Se deben implementar medidas correctoras inmediatamente.
- **Existencia de proyecciones más allá de la zona de peligro de la voladura.** En este caso el riesgo de accidente fatal es muy elevado. Se debe replantear por completo el diseño de la voladura con la ayuda de personal experto. Las voladuras no se deberían reanudar hasta que se pueda asegurar que estas medidas se pueden poner en práctica de manera eficaz.

Es recomendable filmar sistemáticamente las voladuras para evaluar los resultados en términos de fragmentación y empuje, pero

especialmente para poder detectar los orígenes de proyecciones y determinar la causa de cualquier fallo durante la pega.

17. ESPECIFICACIÓN DE VOLADURA

Es necesario realizar, para cada voladura, una documentación que reúna toda la información necesaria para la elaboración de un diseño seguro de voladura y que, a su vez, sirva como instrucción de carga de la pega a los artilleros. Esta especificación de voladura se puede entender como un elemento clave de evaluación de riesgos de las operaciones de carga y disparo. Además, correctamente archivadas, sirve como registro de las operaciones llevadas a cabo y puede ser un importante elemento de consulta en el futuro.

Antes de realizar este documento, la explotación y la dirección facultativa de la cantera deben definir una serie de cuestiones, evaluando los riesgos de manera apropiada:

- Horas preferentes de disparo.
- Límites de la zona de peligro de la voladura, a evacuar durante la comprobación y disparo.
- Cortes de vías públicas, en caso de ser necesario.
- Sistema de prevención de caídas desde el frente de voladura.
- Lugares de disparo y posición de los vigilantes que cortan los accesos a la zona de peligro.
- Tipo de refugio a emplear durante el disparo.
- Protocolo de disparo. Secuencia de señales de sirena durante el mismo y sistemas de comunicación entre el artillero que dispara la voladura y los vigilantes a los accesos.

- Comunicación al conjunto del personal en la explotación antes durante y después de la pega.
- Estructuras a proteger y comunicación con los vecinos en caso de estimarse necesario.

El fin principal de la especificación de voladura es prevenir riesgos durante el disparo de la pega y debe hacerse a medida para cada voladura, en función de los condicionantes de cada pega.

La especificación de la voladura debe ser consecuente con el proyecto de voladuras tipo en la explotación y tener la aprobación de la dirección facultativa de la misma. La especificación de voladura se debe elaborar con el objeto de:

- Asegurar que el riesgo de proyecciones fuera de la declarada como zona de peligro de la voladura es lo más baja posible dentro de unos límites razonables y debe exponer todas las precauciones puestas en práctica para conseguirlo.
- Minimizar el riesgo de fallo de voladura.
- Permitir la localización de cualquier barreno fallido de manera precisa.
- Asegurar que los frentes quedan en condiciones seguras después de la pega.

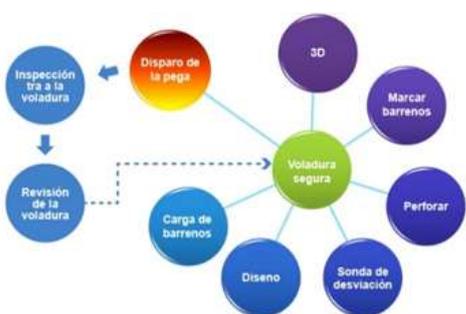


Figura 66: Conjunto de acciones orientadas a la seguridad de la voladura

Además, la especificación debe tener en cuenta:

- La experiencia adquirida en voladuras previas en la explotación.
- Cualquier circunstancia inusual que esté presente o sea muy probable.
- El diseño de la excavación.

17.1 CONTENIDOS DE LA ESPECIFICACIÓN DE VOLADURA

17.1.1 PLANO DE LA EXPLOTACIÓN

El plano de la explotación deberá ser de tamaño mínimo de A4, en el que se presente la siguiente información:

- El frente o la parte de este dónde va a tener lugar la pega;
- La zona de peligro de la voladura;
- El lugar de disparo;
- La posición de los vigilantes de acceso a la zona de peligro.



Figura 67: Plano de la explotación con los elementos principales de acceso y zona de peligro

17.1.2 ESQUEMA DE PERFORACIÓN

El esquema de perforación debe mostrar para cada barreno perforado la siguiente información:

- Número identificador de cada barreno. Este número debe estar pintado con spray en la cantera, junto al barreno, para identificarlo de manera inequívoca.

- Posición real del emboquille, referenciada a unos puntos de referencia GPS.
- Longitud.
- Diámetro de perforación.
- Ángulo y dirección (azimut)

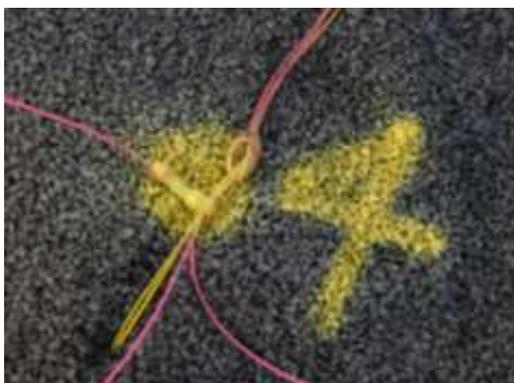


Figura 68: Barreno numerado con spray y conexión verificada

Es recomendable verificar la desviación real de todos los barrenos. La única manera fiable de obtener esta información es mediante el uso de una sonda electrónica de medida de desviación de barrenos. Los barrenos adyacentes a una cara libre se deben verificar siempre de este modo para poder producir un diseño seguro.

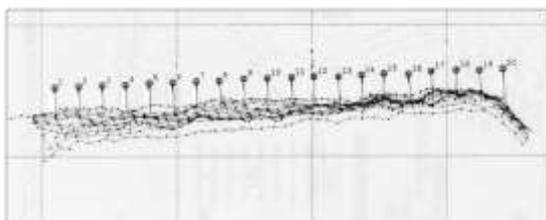


Figura 69: Esquema de la perforación

17.1.3 PERFILES DE LOS BARRENOS ADYACENTES A CUALQUIER CARA LIBRE

Los perfiles se deben obtener a partir de un sistema de perfilometría 3D o de fogrametría con dron. Para evitar confusiones, se debe seguir la misma

numeración de barrenos establecida en el esquema de perforación.

Estos perfiles deben mostrar la piedra real mínima disponible para cada profundidad de barreno. Además, se debe mostrar una línea (paralela al barreno) que marque la piedra nominal de diseño y unos límites de tolerancia de la misma que ayuden al diseño posterior de la carga lineal del barreno. Estos límites de tolerancia suelen ser típicamente de $\pm 10\%$ o ± 30 cm para una piedra nominal de 3m.

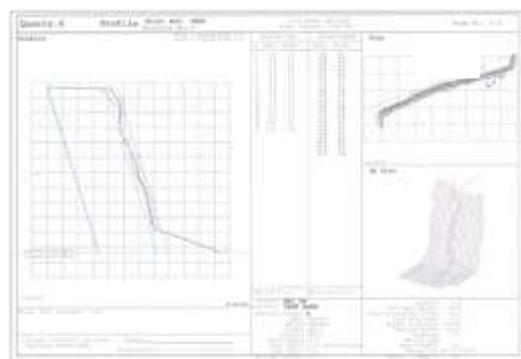


Figura 70: Perfil de un barreno obtenido a partir de un láser 3D y sonda de medición de barrenos

17.1.4 ANOMALÍAS GEOLÓGICAS QUE PUEDAN AFECTAR A LA SEGURIDAD

Se trata de identificar grietas importantes, terreno muy fracturado, vetas de arcilla, discontinuidades de importancia, etc. Para ello se hace uso de dos documentos básicos:

- Parte de perforación. El perforista debe rellenar un documento que informe sobre la calidad de la perforación, metro a metro, para cada barreno. Debe anotar la presencia de roca dura, material roto, material blando, arcilla, etc. Se debe seguir la numeración de barrenos preestablecida para evitar cualquier confusión.



Figura 71: Ejemplo de un parte de perforación reportando cavidades en dos barrenos

- Parte de inspección del frente. Se debe llevar a cabo una inspección del frente de manera visual y registrar las anomalías geológicas detectadas en un esquema del mismo que muestre la posición de cada barreno de la primera fila. Una buena práctica es hacer uso de una imagen digital del frente y anotar los comentarios sobre ella de manera visible y clara.



Figura 72: Ejemplo de una anomalía en el frente, reportada sobre una foto del mismo

17.1.5 PLAN DE CARGA DE CADA BARRENO

A partir de la información obtenida en los puntos anteriores se debe diseñar una carga para cada barreno, mostrando de manera clara:

- La cantidad, tipo de explosivo por cada columna de carga y tolerancia permitida.

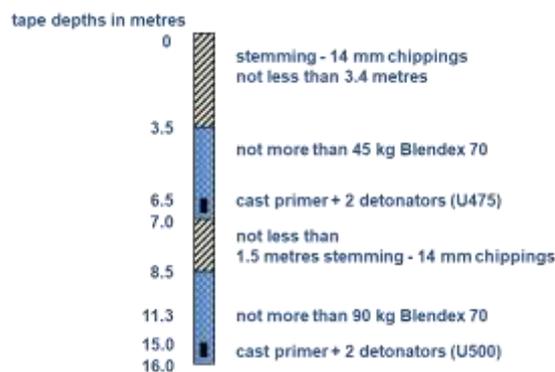


Figura 73: Ejemplo de un diagrama de carga

- Posición exacta de los cebos y los detonadores en el barreno.
- Posición y longitud de cualquier retacado intermedio.
- Longitud de retacado final.

17.1.6 PARTE DE CARGA REAL

Durante la carga, el artillero debe llevar el plan de carga consigo para poder ajustarse al mismo lo máximo posible. Las cantidades reales cargadas se deben registrar junto a las de diseño durante la carga de la voladura.

Lo lógico es que el parte de carga real se muestre sobre la misma hoja que el plan de carga para hacer más sencillo su cumplimentación y comparación posterior.

Cualquier incidencia durante la carga de un barreno se debe de anotar en un pequeño apartado, como, por ejemplo, barreno bloqueado a una cierta profundidad, más cantidad de agua de la prevista en el diseño, etc.

17.1.7 SISTEMAS DE INICIACIÓN

El sistema de iniciación debe incluir el esquema y la secuencia de disparo. El artillero se debe adaptar escrupulosamente al esquema y secuencia de disparo.

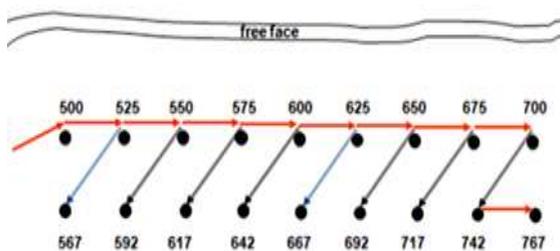


Figura 74: Ejemplo de un esquema de conexión

17.1.8 CONDICIONES DE VISIBILIDAD

Se debe tener especial precaución en las condiciones de visibilidad para minimizar el riesgo de:

- Proyecciones;
- Fallos en la voladura;
- Lesiones durante la inspección del frente antes y después de la pega.

17.1.9 CONDICIONES DEL DISPARO

Se debe anotar la fecha, hora de disparo, las condiciones meteorológicas durante la pega y el registro de vibraciones a una distancia determinada. Estos datos son útiles a la hora de investigar denuncias o quejas por molestias ambientales.

17.1.10 CONDICIONES DE VISIBILIDAD

Se deben realizar fotos del frente desde diferentes ángulos antes y después de la pega. También se deben incluir fotos de cualquier incidencia o anomalía que pueda dificultar la voladura, tales como grietas en la zona de carga, barrenos tupidos, etc.

Es de buena práctica filmar en video todas las voladuras y archivarlas debidamente junto con una copia digital de la especificación d voladura.

18. CARGA Y DISPARO DE LA VOLADURA

La información requerida por el artillero antes de comenzar la carga está contenida en la especificación de la voladura y debe incluir para cada barreno:

- Profundidad de los barrenos.
- Altura del frente.
- Piedra nominal.
- Espaciamiento nominal.
- Ángulos y dirección de perforación.
- Plan de carga y tolerancia permitida.
- Perfiles de los barrenos.
- Cantidad de agua en el barreno.
- Parte de perforación y parte de inspección del frente.
- Esquema y secuencia de disparo.

Antes de comenzar la voladura, el artillero debe cerciorarse de que las condiciones que refleja la especificación de la voladura son compatibles con existentes antes de la carga. Esto debe incluir una inspección visual del frente y el banco para ver que no ha habido desprendimientos de material que puedan haber distorsionado los perfiles.

18.1 CARGA CON EXPLOSIVO CONVENCIONAL

Se debe medir con cinta la profundidad de cada barreno y estimar la altura del agua en el mismo. Si el barreno tiene un exceso de longitud, se debe corregir rellenándolo con material de retacado.

Se prepara un cebo y se deben dejar caer dos cartuchos en el fondo del barreno si se dan las condiciones descritas anteriormente para ello. El cebo solamente se debe preparar para su uso inmediato. Se hacer bajar el cebo a continuación. Se carga el



resto de la carga de fondo. Se mide con cinta y se anota la profundidad.

Si se ha superado el nivel del agua en el barreno se sella el barreno con un cartucho. Si aún hay agua en el fondo, se carga con explosivo resistente al agua hasta que se supera el nivel del agua y se sella el barreno con un cartucho. Se mide con cinta y se anota la profundidad.

Cuando se usan cartuchos de un diámetro en concordancia con el diámetro de perforación, por ejemplo, 85mm dentro de un barreno de 105mm, se requiere una longitud de carga de aproximadamente el triple de la longitud original de agua en el barreno para superar el nivel de agua. El sellado se debe hacer con uno o dos cartuchos más.

Se continúa con la carga del barreno según lo estipulado en la especificación de la voladura. Se debe mantener la cantidad de explosivos por columna, la longitud de cada retacado intermedio y la ubicación del cebo de seguridad. Al cargar con ANFO a granel se debe verificar con regularidad la altura de la carga de explosivo para evitar que se llenen coqueas o grietas en el barreno. Se recomienda verificar la altura de carga cada 25kg (5m en un barreno de 89mm).

18.2 CARGA CON MEZCLA A GRANEL DE ANFO/EMULSIÓN

El proceso es en general similar a la carga con explosivo convencional. Cuando se usan mezclas sensibilizadas con burbujas de gas, se debe esperar un cierto tiempo antes de retacar el barreno para permitir que el producto se expanda correctamente en el barreno.

Por tratarse de explosivos a granel se debe verificar la altura de la carga con regularidad

suficiente para evitar el llenado de cavidades y grietas. Se recomienda comprobar la altura cada 25 kg o 3m de barreno. Esta frecuencia puede variar con las circunstancias.

En cualquier caso, si durante la carga del barreno se exceden las tolerancias de carga marcadas en la especificación de la voladura, se debe consultar con el técnico responsable del diseño de la especificación de voladura y proceder siempre con la aprobación de la dirección facultativa. Se debe anotar en el parte de carga la disposición final de la carga dentro del barreno.

Cuando se termina la carga, se conectan los barrenos siguiendo el esquema estipulado en la especificación de la voladura, verificándose las conexiones. Se recomienda una verificación doble, dos personas por separado deberán realizar la verificación y de manera independiente. Las conexiones ya revisadas se deben marcar con espray. Se conecta el circuito de detonadores a la línea de tiro.

Se deben evaluar los riesgos para elegir correctamente el lugar de disparo. Este debe estar fuera de la declarada como zona de peligro previamente. Se debe elegir un lugar protegido de las caídas de bloques de un frente adyacente así como de las proyecciones de la propia voladura. La dirección preferente es la contraria a la dirección de salida de la voladura y desplazada lateralmente respecto a esta. Se debe disparar desde un refugio apropiado para este fin. La maquinaria tipo palas o camiones no deberán emplearse nunca como refugio.



Figura 75: Refugio adecuado para el disparo de una voladura

En caso de pega eléctrica, se procede a la verificación del sistema. Esta operación sólo se puede realizar desde el lugar de disparo una vez que la zona de peligro de la voladura está evacuada y los accesos cortados. Sólo el artillero encargado del disparo debe tener la llave para operar el explosor.

Si se cumplen todas las condiciones de seguridad y el circuito de seguridad está correcto, se puede proceder con el protocolo de disparo establecido en la explotación. Se deben seguir las normas establecidas para efectuar el disparo, estas deberán ser señales acústicas de sirena antes, durante y después del disparo, comunicación con todos los vigilantes de los accesos a la zona de peligro, etc.

El explosor no se puede conectar hasta que el artillero responsable del disparo tenga la certeza absoluta de que la zona de disparo está evacuada y los accesos están cortados. Debe comunicarse con los vigilantes de los accesos y darles aviso del inminente disparo.

Si no hay incidencias, se debe hacer sonar un aviso de sirena específico justo antes de la pega. Poco tiempo después (el establecido por las normas de la

explotación) se debe tocar la sirena de manera continua y disparar la voladura sin detener el sonido de sirena.

Una vez disparada la pega, el artillero debe acceder al frente, después de que se hayan disipado los humos y la visibilidad sea buena, para comprobar que no hay barrenos fallidos. En ese caso, debe hacer sonar la señal de sirena acústica de final de peligro. Los vigilantes de los accesos a la zona de peligro no deben abandonar su puesto hasta que la señal de final de peligro haya sonado y hayan recibido la autorización del artillero.

Todo el personal de la explotación debe estar familiarizado con las normas internas de protocolo de disparo y con el código de sirenas establecido.

19. BARRENOS FALLIDOS

19.1 FALLO TOTAL EN LA INICIACIÓN DE LA PEGA

Al realizar el disparo puede ocurrir que se produzca algún fallo en el sistema de iniciación, impidiendo la activación de los detonadores y el disparo de la voladura. Si esto sucede, se debe dar aviso a la dirección facultativa y a la dirección de la explotación y comunicar lo sucedido a los vigilantes de los accesos a la zona de peligro. Estos se deben mantener en posición hasta nueva orden y la zona de peligro se debe mantener evacuada en todo momento.

El artillero, por precaución, no debe acceder a la zona de la voladura para solventar el problema hasta pasados 5 minutos. Si la iniciación se diese con mecha lenta y detonador ordinario, se debe esperar al menos 30 minutos.

En función del sistema de iniciación, el artillero deberá verificar todas las conexiones, así como la integridad del circuito nuevamente, debiendo corregir el problema en función de su origen.

Hay que considerar siempre el fallo del explosor como posible causante de un problema de este tipo, por lo que es recomendable disponer de más de una unidad de disparo en buen estado.

Una vez resuelto el problema, se puede proceder a disparar nuevamente la voladura. Se debe informar a los vigilantes de los accesos a la zona de peligro y proceder de nuevo con el protocolo de disparo de la voladura.

19.2 FALLO PARCIAL. BARRENOS FALLIDOS

El artillero al cargo debe inspeccionar el resultado de la voladura inmediatamente después del disparo, una vez que se hayan disipado los humos de voladura y el acceso a la zona sea seguro y con buena visibilidad.

Si el resultado es satisfactorio y no existe ningún indicio de fallo, debe dar la indicación del toque de sirena correspondiente a la señal de fin de peligro y comunicar con los vigilantes a los accesos a la zona de peligro que la operación de voladura ha concluido y pueden permitir el paso.

Por el contrario, si se advierte cualquier indicio del tipo:

- Explosivos o detonadores visibles, sin detonar;
- Movimiento inexistente o deficiente del terreno;
- Pobre fragmentación y desplazamiento en algunas áreas de la voladura;

- Vibración anormalmente alta durante la pega;
- Ruido producido durante la pega más bajo de lo esperado.

Se debe proceder a la búsqueda de algún barreno fallido en las zonas afectadas. En caso de existir éstos, se debe dar aviso inmediato a la dirección facultativa y a la dirección de la explotación y activar el protocolo de actuación en caso de barreno fallido; el cual debe respetar escrupulosamente lo establecido por el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera en cuanto a señalización de barrenos y prohibición de acceso a la zona afectada hasta que se resuelva la situación de manera satisfactoria.



Figura 76: Falta de movimiento tras la pega que indica la presencia de barrenos fallidos

La situación no se suele resolver de manera rápida. Una vez evaluado el riesgo, la zona de peligro de la voladura podrá abrirse de nuevo. La zona del fallo, sin embargo, debe quedar siempre claramente delimitada por señales visibles y el acceso a la misma restringido. Cualquier operación en el frente de carga, saneo o similar se debe posponer hasta haber solventado la situación de manera satisfactoria. El conjunto del personal de la cantera debe ser informado de la situación y del peligro existente.

El conocimiento de la localización exacta de los barrenos, gracias al sistema de perfilometría 3D, puede ayudar a solventar esta difícil situación, ya que los barrenos fallidos pueden haber quedado parcialmente enterrados por material volado, siendo muy difíciles de localizar.

En estos casos existen las siguientes líneas de actuación:

- **Los tubos o hilos de los detonadores están en estado de uso o parte de la carga se encuentra accesible.** Se debe plantear disparar de nuevo el barreno fallido tomando las precauciones que se detallan a continuación.

La comprobación de hilos de detonadores eléctricos con un óhmetro se debe llevar a cabo desde un lugar seguro y con la zona de peligro totalmente evacuada. Si la carga está accesible, se deberá alojar un nuevo cebo, retacar y preparar el disparo.

La operación de disparo requiere una evaluación especial de los riesgos en cada caso concreto. Los barrenos fallidos pueden quedar muy descabezados y con piedra insuficiente alrededor. Esta se debe medir antes de proceder, a ser posible con medios electrónicos (Láser 3D). Se hace necesario expandir los límites de la zona de peligro durante el disparo hasta donde sea posible. Para aumentar el confinamiento de la carga y reducir la generación de proyecciones, se debe considerar el vertido cuidadoso de material grueso alrededor del barreno.

Hay que considerar que, si el barreno fallido se encuentra aislado en un bloque de material sin fragmentar, una línea de actuación recomendable puede ser trocear el bloque mediante un parche de explosivo adosado a él.

- **Los hilos o tubos de los detonadores, o la propia carga no se encuentra accesibles.** Se

debe considerar la perforación y disparo de un barreno paralelo de eliminación.

Este barreno, siguiendo lo establecido por el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera se debe perforar a una distancia no inferior a diez veces el diámetro de perforación. En caso de haber cargado el barreno con explosivo a granel o con encartuchado cargado mediante máquinas (cargadoras neumáticas de cartuchos), esta práctica queda prohibida.



Figura 77: Esquema de perforación de un barreno paralelo

La operación entraña muchos riesgos que deben ser evaluados debidamente:

- Colapso del frente durante la perforación;
- Iniciación accidental durante la perforación;
- Proyecciones durante el disparo controlado o por la iniciación accidental del mismo. Se deben extremar las precauciones, del mismo modo que en el caso de posibilidad de disparo del barreno fallido.

Cualquier otra práctica alternativa para la eliminación de barrenos fallidos debe ser autorizada por la autoridad minera.

En ningún caso se pueden dejar los barrenos fallidos sin neutralizar.

Es importante realizar una investigación detallada tras cualquier fallo en una voladura que permita determinar de la manera más precisa posible el origen del fallo. Para ello, se debe producir un informe



detallado. Esta acción podrá prevenir la repetición de fallos similares en el futuro.

La existencia de una especificación de voladura clara y fácil de interpretar, hace mucho más sencilla la investigación de cualquier fallo o incidente ocurrido durante el disparo de la voladura.

20. DESTRUCCIÓN DEL EXPLOSIVO SOBRENTE

Si no existe la posibilidad de almacenamiento en el lugar de consumo, el explosivo sobrante deberá ser, por orden de preferencia:

- Devuelto a un depósito debidamente autorizado;
- Almacenamiento, en caso de existir un depósito autorizado con capacidad suficiente.
- Destruído tras la voladura

En caso de existir depósito autorizado en la instalación con capacidad suficiente y bajo la responsabilidad del que fuere autorizado para la utilización de explosivos, el explosivo extraído o recibido que no se consuma directa y seguidamente durante el proceso de voladura, será inmediatamente almacenado, con excepción del explosivo a granel tipo tolva. El explosivo a granel deberá ser destruido con las suficientes medidas de seguridad dictadas por el director facultativo o el responsable de la voladura.

Únicamente se podrá devolver el explosivo sobrante en un consumo al depósito de procedencia o a otro depósito debidamente autorizado, cuando se carezca de depósito autorizado en la instalación con capacidad suficiente, y concurren causas justificadas ajenas al consumidor (incidencias

climatológicas, laborales, accidentes, averías, etc.). Para dicha devolución habrá de cumplirse con lo establecido en el apartado 5 del Reglamento de Explosivos.

Cuando por circunstancias extraordinarias y debidamente justificadas no se pueda realizar el almacenamiento, devolución o destrucción del explosivo sobrante en el proceso de voladura, el responsable del consumo lo comunicará por el medio más rápido a la Intervención de Armas Explosivos correspondiente, que establecerá el número de vigilantes de explosivos adecuado en relación a la cantidad de explosivos, lugar de custodia y condiciones para impedir sustracciones o accidentes.

Se podrá destruir el explosivo sobrante en un proceso de voladura cuando el director facultativo considere que la destrucción no supone riesgo para la seguridad industrial y la seguridad y salud en el trabajo.

La destrucción del material explosivo (sobrante o localizado después de una voladura) se realizará por personal poseedor de las habilitaciones correspondientes, cumpliendo con lo establecido en las disposiciones internas de seguridad (DIS). Se levantará acta por el responsable del consumo, la cual se remitirá a la Intervención de Armas y Explosivos de la Guardia Civil del lugar donde se realice la destrucción. Esta remisión se efectuará dentro de las 48 horas siguientes a la destrucción.

Si las cantidades sobrantes son importantes, nunca se debe considerar la opción de destrucción en el punto de consumo. Tan solo se debe considerar la destrucción in situ cuando se trata de muy pequeñas cantidades y siempre siguiendo



escrupulosamente las recomendaciones de seguridad del fabricante.

Antes de nada, se deben tomar una serie de medidas para que la cantidad de explosivo sobrante sea lo más reducida posible:

- La carga con explosivos sensibilizados in situ reduce la probabilidad de tener explosivo sobrante prácticamente a cero.
- En caso de carga convencional, se debe solicitar la carga necesaria calculada en la especificación de voladura.
- La presencia de agua en los barrenos puede invalidar por completo un pedido de explosivos. Este es el caso de un pedido para cargar barrenos mayormente secos, pero que el día de la voladura se encuentran con varios metros de agua. Se hace imprescindible conocer con precisión el agua en cada barreno antes de realizar el pedido y considerar un cierto margen de seguridad para la cantidad de explosivo encartuchado necesario, en previsión de que los barrenos se puedan recargar con más agua de infiltración. La experiencia a este respecto en cada zona de la explotación es un factor importante.
- Por seguridad, el método de destrucción preferente es la detonación controlada dentro de un barreno. Por este motivo es recomendable prever en la especificación de voladura la perforación de algún barreno extra a los estrictamente necesarios en la pega para poder detonar el producto sobrante. Es recomendable que estos barrenos puedan realizar algún trabajo útil en la misma, por ejemplo, barrenos cortos para mejorar la fragmentación en la zona del retacado, o algún barreno de ayuda que se pueda cargar parcial o totalmente para facilitar la rotura del pie de banco en alguna zona muy confinada de la voladura, como esquinas en voladuras multifila.

A pesar de cumplir con todas estas precauciones, es frecuente que algún barreno no pueda cargarse por completo, o que incluso haya barrenos que hayan quedado por completo inutilizados. Esta es una causa frecuente de producto sobrante en la voladura.

En ese caso, hay que intentar usar todo el explosivo encartuchado en la pega en detrimento del ANFO, que es más fácil y seguro de eliminar. En el parte de carga de la especificación de voladura se debe anotar esta incidencia.

El cordón detonante se debe intentar destruir dentro de los barrenos de la pega, formando madejas de un grosor compatible con el diámetro de barreno y de una longitud de unos 50 cm aproximadamente. Es recomendable meterlo justo por debajo del retacado final para que se destruya durante la voladura. También debe anotarse esta incidencia en el parte de carga de la especificación de voladura.

El cordón detonante sobrante también se puede destruir detonándolo al aire, junto con la voladura. Esta práctica llega a generar elevados niveles de onda aérea que en casos extremos pueden llegar a ocasionar daños materiales y físicos. Sólo se debe considerar con cordones de gramaje reducido o medio (hasta 12 g/m) y en cantidades sobrantes muy reducidas (unas pocas decenas de metros). Es recomendable enterrar el cordón con tierra blanda y húmeda suficiente que amortigüe la onda aérea. Sólo se debe considerar en áreas muy aisladas. Se debe evaluar el riesgo en cada caso concreto y descartar siempre que exista en la proximidad zonas sensibles o habitadas.

Los detonadores sobrantes se pueden detonar después de la pega, tras comprobar



que no ha habido barrenos fallidos, y siguiendo las indicaciones del fabricante. Se deben destruir los casquillos enterrados en suficiente material inerte (material de retacado, por ejemplo) que amortigüe la metralla. Se deben disparar desde lugar seguro y a una distancia razonable, protegidos de un impacto directo de metralla. Se debe mantener a todo el personal alejado de la zona donde se lleva a cabo esta operación, poniendo las precauciones adecuadas para que nadie pueda aproximarse.

En caso de hacerse necesaria la quema de pequeñas cantidades de explosivo, esta operación se realizará después de la voladura, siguiendo las recomendaciones del fabricante para cada producto. Antes de realizar esta operación se deben evaluar los riesgos existentes.

Se debe evitar siempre el sobrecalentamiento del explosivo aún sin degradar, para impedir que detone por alta temperatura.

- Lo primero es verificar que no existe una limitación legal para encender fuegos. Esto puede suceder en muchas zonas, especialmente en verano, para evitar incendios forestales o por motivos medioambientales.
- Plantear la hoguera cerca de la zona de voladura, en terreno rocoso sin vegetación cerca de ella para no provocar un incendio forestal. También se debe alejada de cualquier zona o elemento que pueda prender con facilidad. Hay que tener en cuenta la dirección e intensidad del viento.
- Destruir el explosivo en muy pequeñas cantidades, 10 o 12 cartuchos a lo sumo, nunca en montones ni dentro de las cajas.
- Los cordones nunca se quemarán en sus carretes, sino bien extendidos en longitudes cortas, de unos 5m como máximo.
- Se debe extender el explosivo o el cordón sobre una capa de combustible que arda bien, como paja seca, matorrales o cartón.

Antes de prender el fuego, es recomendable rociar el conjunto con gasoil para asegurar una llama viva que consuma el explosivo por completo en pocos minutos.

- Prender la hoguera de tal manera que el fuego avance contra el viento, nunca a favor.
- Esta operación siempre entraña un alto riesgo. La efectuará el personal estrictamente necesario, a ser posible una sola persona.
- En cuanto se prenda fuego a la hoguera, se debe desalojar la zona por completo, sin esperar a ver cómo progresa el fuego. Todo el personal se debe encontrar a una distancia de seguridad más que conservadora y poner las precauciones necesarias para asegurar que nadie pueda aproximarse a ella.
- Tan solo se podrá regresar a la zona de destrucción 30 minutos después de que el fuego se haya extinguido por completo.

Los envases sobrantes, como cajas y sacos, se pueden quemar después de la voladura si no existe una restricción medioambiental para ello. Se deben tomar todas las precauciones mencionadas para evitar un incendio en la zona.

La destrucción de los explosivos será supervisada por el personal de seguridad privada que preste servicio en el consumo, el cual firmará el acta de destrucción que se confeccione al efecto. En el acta de destrucción se harán constar los siguientes datos:

- Fecha.
- Hora.
- Procedencia (no consumido o hallazgo después de voladura).
- Clase de explosivo.
- Cantidad.
- Datos del responsable de la destrucción.
- Datos del personal de seguridad privada que preste servicio en la destrucción.

Previamente, es imprescindible verificar que las cajas no contienen ningún explosivo o detonador. Durante la quema, el personal debe mantenerse alejado de la zona como medida de precaución.

Si existe una restricción medioambiental, se debe contactar con un gestor especial para este tipo de residuos.

21. IMPACTO AMBIENTAL DE LA VOLADURA

La ejecución de voladuras lleva asociados una serie de impactos en el entorno:

- Vibraciones;
- Onda aérea;
- Polvo;
- Emisión de gases.



Figura 78: Efectos ambientales de las voladuras

El nivel de las vibraciones generadas depende de varios factores:

- Carga máxima operante;
- Distancia y orientación a la voladura;
- Secuencia de disparo;
- Calidad en el diseño y ejecución de la voladura.

Antes de comenzar las operaciones de perforación y voladura en una zona cercana a alguna estructura sensible o a núcleos habitados, se debe llevar a cabo un estudio

de la transmisión de vibraciones del terreno.

La normativa española es la norma UNE 22.381-93 determina los límites tolerables de vibración debida a voladuras para cada frecuencia y tipo de estructura.

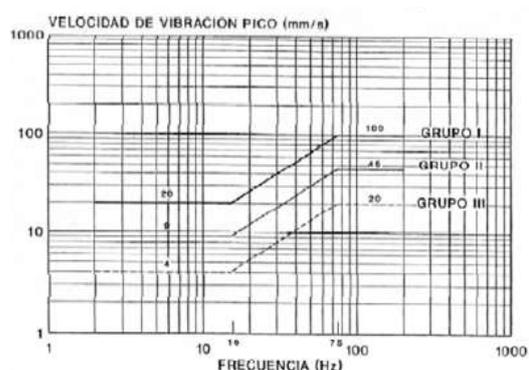


Figura 79: Velocidad de vibración normal UNE 22.381-93

Un estudio de vibraciones tiene por objeto la determinación de la ley que relaciona el nivel de vibración V , generado por una carga instantánea de explosivo Q , disparada a una distancia determinada D .

Esta ley es de la forma:

$$V = k * Q^\alpha * D^\beta$$

K , α y β son las variables características del terreno y se determinan en el estudio. Una vez conocidas estas variables, se puede predecir la carga operante máxima para no sobrepasar un nivel de velocidad establecido.

Se diseña un ensayo en el terreno y se registra la vibración de una serie de cargas a diferentes distancias. El ensayo debe incluir también el disparo de cargas secuenciadas entre sí para evaluar el efecto de la superposición de ondas.

Los resultados obtenidos permiten obtener la ley de transmisión del terreno mediante un ajuste estadístico de regresión.

Además, se lleva a cabo un análisis de transformada de Fourier de las ondas de vibración registradas en el ensayo para determinar las frecuencias predominantes.

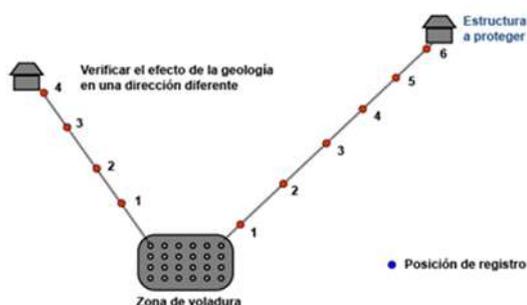


Figura 80: Disposición de sismógrafos en el estudio de una zona de voladuras

Con la ley de transmisión y el límite establecido en base a la normativa, se pueden elaborar las tablas de carga – distancia. Estas tablas muestran las cargas operantes máximas que se podrían detonar para no sobrepasar la velocidad de vibración límite a una distancia determinada.

Una vez determinada la carga máxima operante, el diseño de la voladura se debe adecuar a esta para no sobrepasar el nivel de vibración permitido en cada tipo de estructura. Se debe registrar la vibración de cada voladura en la estructura sensible más próxima para llevar un control de los niveles de vibración generados. Estos valores se pueden usar a posteriori para mejorar el nivel de predicción de la ley de transmisión obtenida en el ensayo.

Si la carga operante máxima es muy reducida, puede ser necesario el uso de cargas partidas dentro del barreno y esquemas de disparo que aseguren que en ningún momento hay más de una carga

detonando en un intervalo menor o igual a 8ms.



Figura 81: Cargas partidas en un barreno para reducir la carga operante (MIC)

Una fuente frecuente de altas vibraciones es el disparo de barrenos con un consumo específico demasiado bajo, una piedra excesiva en el frente o

con un nivel de sobreperforación elevado. De nuevo, un diseño correcto, asistido por láser 3D y sonda de desviación de barrenos, es una medida eficaz para ayudar a solventar este problema.

Un tipo de ensayo recomendable cuando se va a trabajar con detonadores electrónicos, es la simulación del efecto vibratorio para la obtención idónea de tiempos de disparo. Para ello, se dispara un único barreno con cara libre en el frente; cargado para una voladura normal de producción. Se registra la onda vibratoria a unas determinadas distancias. Esta onda después se reproduce a diferentes combinaciones de tiempos que simulan los retardos entre barrenos y filas.

Este estudio proporciona la combinación idónea de tiempos que genera un nivel de vibración global más reducido. Además, esta combinación de tiempos proporciona



generalmente el mejor nivel de fragmentación.

En ocasiones, un estudio de este tipo recomienda un tiempo entre barrenos inferior a 8ms. El nivel de precisión requerido para garantizar esto sólo es alcanzable con detonadores electrónicos y proporciona un nivel de resultados óptimo.

21.1 ONDA AÉREA

La onda aérea es generada por la onda de compresión generada en el aire como resultado de una detonación. El ruido es la parte de esta onda que se encuentra en el rango audible de frecuencias (20 Hz – 20,000 Hz).

La onda aérea depende en gran medida del tamaño de la carga y de su grado de confinamiento. El efecto puede ser potenciado por condiciones atmosféricas desfavorables como la dirección del viento desfavorable, niebla y nubes bajas.

En la práctica, el diseño de la voladura y su ejecución debe minimizar la onda aérea generada. Las buenas prácticas a este respecto van encaminadas a asegurar la detonación confinada de todas las cargas:

- Garantizar una piedra adecuada delante de los barrenos. El sistema de perfilometría en 3D es fundamental en este aspecto.
- Mantener una carga operante reducida. Es una buena práctica que los barrenos detonen todos de manera individual, sin solaparse en periodos de 8ms o menos.
- Evitar la iniciación en superficie de barrenos.
- Retacar los barrenos con una longitud suficiente de material adecuado.
- Evitar la detonación al aire de cordones detonantes u otras cargas.

22. CERTIFICACIÓN Y HOMOLOGACIÓN DE EQUIPOS

La Instrucción Técnica Complementaria 12.0.01 del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera desarrolla el procedimiento a desarrollar para la certificación u homologación de los equipos empleados en las voladuras o en el empleo de explosivos.

22.1 CERTIFICADO DE EXAMEN DE TIPO

Para todos los productos definidos en el apartado siguiente que requieren homologación, se requiere la obtención del Certificado de Examen de Tipo emitido por un Laboratorio Oficial Acreditado.

El examen de tipo es el procedimiento por el cual un Laboratorio Oficial Acreditado examina el diseño y realiza las pruebas necesarias para verificar el cumplimiento de los requisitos que son de aplicación a un producto en particular. Según la naturaleza de los requisitos aplicables, como resultado del examen se emitirá uno de los siguientes documentos:

- Un certificado de control, en el que se acredita el cumplimiento de los requisitos de seguridad que se establecen en especificaciones técnicas, en criterios técnicos o en instrucciones técnicas.
- Un certificado de conformidad, en el que se acredita el cumplimiento de los requisitos de una norma o de un proyecto de norma.

22.2 HOMOLOGACIÓN

Para la solicitud de la homologación del producto se necesita primeramente obtener el Certificado de Tipo emitido por



un Laboratorio Oficial Acreditado. Una vez obtenido el Certificado de tipo se solicitará su homologación, previo informe favorable de la Comisión de Seguridad Minera, por parte de la Dirección General de Política Energética y Minas. Acompañando la solicitud se deberá presentar:

- Nombre del fabricante, con los datos de su identificación industrial.
- Identificación de la fábrica o taller donde se fabrica el producto.
- Denominación del producto.
- Plano o planos del fabricante que defina claramente el producto con fecha y firma.
- Documento descriptivo del fabricante.
- Certificado de Examen de Tipo.

Los productos que requieren homologación según la ITC 12.0.01 del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera son:

- Explosores para detonadores eléctricos y no eléctricos.
- Explosores para detonadores electrónicos.
- Óhmetros y comprobadores de línea para explosivos.
- Cargadoras de explosivos.
- Mangueras para la carga de explosivos.
- Cables y accesorios para línea de pega.
- Iniciadores eléctricos para pegas no eléctricas.

Estos productos podrán ser utilizados en cualquier emplazamiento.

En todos los casos, el mandatario o importador del producto, con personalidad jurídica en España, hará acompañar a cada suministro de producto una declaración de conformidad en la que certificará que, bajo su única responsabilidad, el producto en cuestión que suministra, identificado por el número de serie o en su defecto por el lote o

fecha de fabricación, es conforme a los requisitos de seguridad establecidos en la ITC 12.0.01. El firmante deberá acreditar el poder para comprometer la responsabilidad del fabricante o de su representante. La declaración de conformidad contendrá la siguiente información:

- El nombre o la marca de identificación y el domicilio del fabricante o de su representante establecido en España.
- La denominación del producto.
- En su caso, la denominación del Laboratorio Oficial Acreditado que realice el procedimiento de control de la fabricación de los productos.
- En su caso, el número de certificado de tipo o unidad.
- Referencias a las normas y especificaciones técnicas utilizadas.
- Identificación del firmante.
- Fecha de la declaración (debe ser a posteriori a la de fabricación).

Previamente, el fabricante habrá elaborado un expediente técnico que contendrá todos los documentos y registros que se requieran según el procedimiento de evaluación de la conformidad a que deba someterse.

Durante un periodo de diez años a partir de la última fecha de fabricación del producto, el comercializador deberá poder garantizar que el fabricante mantendrá el expediente técnico a disposición de las autoridades nacionales que lo requieran por causa justificada.

22.2.1 CONTROL DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS

El control de fabricación de productos es el procedimiento por el cual se examina, mediante auditorias e inspecciones, el control de la fabricación de los productos al



objeto de verificar su conformidad con los prototipos aprobados. Las auditorias e inspecciones serán realizadas por un Laboratorio Oficial Acreditado.

El fabricante deberá aplicar un sistema aprobado de calidad de la producción o del producto, así como realizar una inspección y ensayos de los productos acabados según un control interno de fabricación y estará sujeto a la vigilancia de la certificación de tipo.

El fabricante presentará para los productos una solicitud de evaluación de su sistema de calidad ante un Laboratorio Acreditado. Esta solicitud incluirá:

- Toda la información pertinente según la categoría del producto.
- Documentación relativa al sistema de calidad.
- Documentación técnica del producto aprobado.

El sistema de calidad deberá garantizar la conformidad de los aparatos con el tipo descrito en el certificado de control y con los requisitos de normas técnicas que le sean aplicables.

Todos los elementos, requisitos y disposiciones adoptados por el fabricante deberán figurar en una documentación llevada de manera sistemática y ordenada en forma de medidas, procedimientos e instrucciones escritas. Dicha documentación del sistema de calidad deberá permitir una interpretación uniforme de los programas, planos, manuales y expedientes de calidad. En especial, incluirá:

- Objetivos de la calidad, el organigrama y las responsabilidades de del personal de

gestión y de sus poderes en lo que respecta a la calidad de los explosivos.

- Los procedimientos de fabricación, técnicas de control y garantía de calidad, así como de las técnicas y acciones sistemáticas que se apliquen.
- Los controles y ensayos que se realicen antes de, durante o después de la fabricación, con indicación de la frecuencia que se realicen.
- Los expedientes de calidad.
- Los medios de vigilancia que permitan controlar la obtención de la calidad necesaria de los productos y el funcionamiento eficaz del sistema de calidad.

El Laboratorio Oficial Acreditado evaluará el sistema de calidad para determinar si cumple las exigencias especificadas anteriormente, y dará por supuesto el cumplimiento de dichas exigencias cuando se trate de sistemas de calidad que apliquen la correspondiente norma armonizada.

El objetivo de la vigilancia del sistema de fabricación es comprobar que el fabricante cumple debidamente las obligaciones que le impone el sistema de calidad aprobado. El fabricante permitirá la entrada del Laboratorio Oficial Acreditado en las fábricas, almacenes e instalaciones de inspección y ensayos, a efectos de inspección, y le proporcionará toda la información necesaria, en especial:

- La documentación sobre el sistema de calidad.
- Los expedientes de calidad, como, por ejemplo, los informes de inspección, los datos sobre ensayos y calibración, o los informes sobre la calificación del personal de que se trate.



El Laboratorio Oficial Acreditado efectuará periódicamente auditorías a fin de asegurarse de que el fabricante mantiene y aplica el sistema de calidad y facilitará un informe de la auditoría al fabricante.

El Laboratorio Oficial Acreditado podrá efectuar visitas de inspección no anunciadas al fabricante. En el transcurso

de dichas visitas, podrá efectuar o hacer efectuar ensayos con objeto de comprobar, si se considera necesario, el buen funcionamiento del sistema de calidad. Posteriormente presentará al fabricante un informe de la inspección y, si se hubiese realizado algún ensayo, un informe de los mismos.



BIBLIOGRAFÍA

- EPC UK EXPLOSIVES (Technical Services Department) – Quarry Blasting Course. 2012-2019
- MP AWARDS – Explosives at Quarries (Quarries Regulations 1999 / Guidance Note Series). 2014
- SFEPA – Guide de Bonnes Pratiques en Pyrotechnie. 2015
- EPC GROUPE – Catálogos y hojas técnicas. 2016
- LOPEZ GIMENO - Manual de Perforación y Voladura de rocas. 1992
- CALDER & WORKMAN INC. – Wall Control Blasting
- COMUNIDAD DE MADRID – Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Canteras de Áridos. 2011
- U.S. ARMY – Explosives and Demolitions. 2007
- ENAEX S.A. - Manual de Tronadura
- DAVEY BICFORD – Hojas de producto y manuales Daveytronic / Daveynel / Daveycord
- www.safequarry.com