

# Optimización de voladuras en canteras 2.0

## 1.- Introducción

La primera fase de la optimización de voladuras consiste en comprender los mecanismos de fragmentación de la roca y su dependencia de la geología de cada explotación. Es fundamental determinar qué objetivo se pretende con las voladuras: máxima fragmentación, control de las vibraciones, escollera, o protección de taludes finales, por citar algunos. Esta fase también incluye la etapa de auditorías del estado 0 (cero), o inicial, para establecer los parámetros de referencia y comparación que nos indiquen si mejoramos o no. Es decir, la optimización 1.0, o el plan de mejoras de voladuras, comienza con la definición de un primer diseño de voladura basado en todo lo anterior.

La fase segunda, 2.0, consiste en la implementación durante un tiempo representativo del primer diseño de voladura de optimización, y su seguimiento en toda la cadena de elaboración como se describe en este texto. Un ingeniero de voladuras, embebido en el personal de perforación y voladura, y en coordinación con los departamentos de carga-transporte y planta, asegura el comportamiento consistente de las voladuras, toma y gestiona datos y la evolución de los indicadores clave de rendimiento (KPI) y con ellos establece diseños evolucionados a partir del 1.0,

Compañía General de Canteras S.A. y Blast Consult S.L. desarrollan un proyecto de optimización de voladuras 2.0. en la C.E. “La Utrera”-Málaga.

Desde Agosto de 2007, fecha de comienzo de las primeras auditorías de control para

determinar el “estado 0”, se ha venido implementando un programa de gestión y control integral de voladuras. Este proyecto incorpora de manera semi-permanente en la explotación un ingeniero de Blast Consult S.L. en coordinación con el personal de la cantera. El presente texto refleja los resultados de dicho programa de optimización tras un periodo de control superior a un año.

## **2.- Control de voladuras**

El primer paso, para realizar una mejora de las voladuras es conseguir un absoluto control y predictibilidad de su comportamiento. Cuando se alcanzan voladuras con un comportamiento consistente (resultados repetitivos), es cuando se puede comenzar a realizar cambios y cuantificar sus efectos.

El control de voladuras requiere tener en cuenta diferentes elementos que afectan a su comportamiento como son:

**2.1.- Evaluación del lugar. Esta fase incluye un examen de la geología, determinar el objetivo de las voladuras e incorporar las restricciones que sean necesarias por seguridad, vibraciones y agua.**

El macizo rocoso es de caliza con hasta 4 familias de juntas diferentes. Se documentó la presencia de cuevas con relleno de arcilla en bancos 8,7 y 6 y ocasionalmente en bancos inferiores debido a infiltraciones kársticas por 2 paleocauces en montera.

Al tratarse de un macizo de roca de dureza media-alta con grietas de relleno débil (arcillas), el diseño de la misma debe tener en cuenta la necesidad de tiempos cortos y

salida de la roca suficiente para prevenir cortes de barrenos, desprendimiento de bloques y daños a los sectores colindantes con la voladura.

Igualmente, el/los objetivos de las voladuras son:

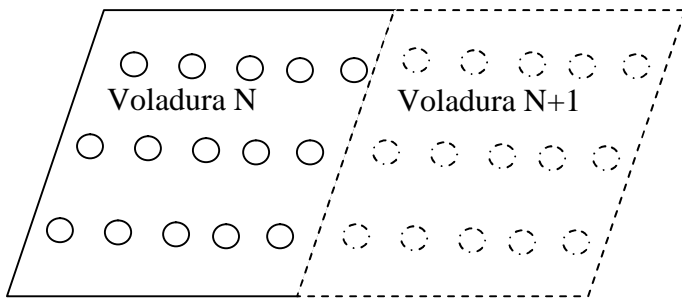
- Producción de escollera para obras puntuales en banco de montera
- Producción de todo uno de voladura para venta directa
- Producción de roca bien fragmentada para tratamiento en planta
- Minimización de finos por pérdida de valor de venta de estos tamaños

**2.2.- Diseño de Voladura** acorde a los objetivos establecidos anteriormente. Para esto, se estudiaron los criterios norteamericanos y europeos de diseño y se aplicó un diseño de partida, que también tenga en cuenta el equipamiento de carga y transporte. Al ser palas cargadoras, se busca una pila bien esponjada y desplazada, que facilite la excavabilidad del material.

**2.3.- Preparación del banco.** Antes de implementar el diseño de la voladura, ejecutando la perforación de los barrenos, se requiere la preparación del banco.

Esta fase consiste en la limpieza de la superficie del mismo, siendo necesaria la suficiente extensión para implementar la voladura tipo y una geometría adecuada que facilite el funcionamiento del explosivo hacia la fragmentación y el desplazamiento.

Por esto, el diseño de la voladura N, debe tener en cuenta la voladura siguiente N+1, la cual se intenta que presente la misma geometría, extensión y condiciones geométricas que la N, de forma que su comportamiento, una vez más, sea consistente y homogéneo.



*Figura 1: Ejemplo de planificación de voladuras para conseguir geometrías repetitivas con doble cara libre (esquina superior izquierda) que será por defecto el punto de inicio de la voladura*

#### **2.4.- Configuración de la malla.**

Las voladuras en cantera raramente superan las 4 filas en profundidad. Por esto, la primera fila, además de determinante en el comportamiento de las filas posteriores, representa un mínimo del 25% de la roca a volar. El emplazamiento preciso de estos barrenos de primera fila es fundamental de cara a una fragmentación homogénea.

La configuración de estos barrenos de primera fila, siempre afectados por una geometría dependiente de la aparición de bloques, voladizos o cuevas, se realiza mediante perfilometría láser 2D sistemática pre-perforación. Así, los emboquilles todos los barrenos son marcados mediante pintura fosforescente, de manera que la precisión en su emplazamiento no supere un error de 20 cm.

Igualmente, la altura de banco se determina para cada nivel de la explotación e, incluso, para diferentes zonas de un mismo nivel de trabajo. Esto es fundamental para determinar la longitud de perforación correcta y conseguir un arranque en el pie de banco adecuado.



*Figura 2: Perfilometría 2D de cada barreno del frente de voladura*

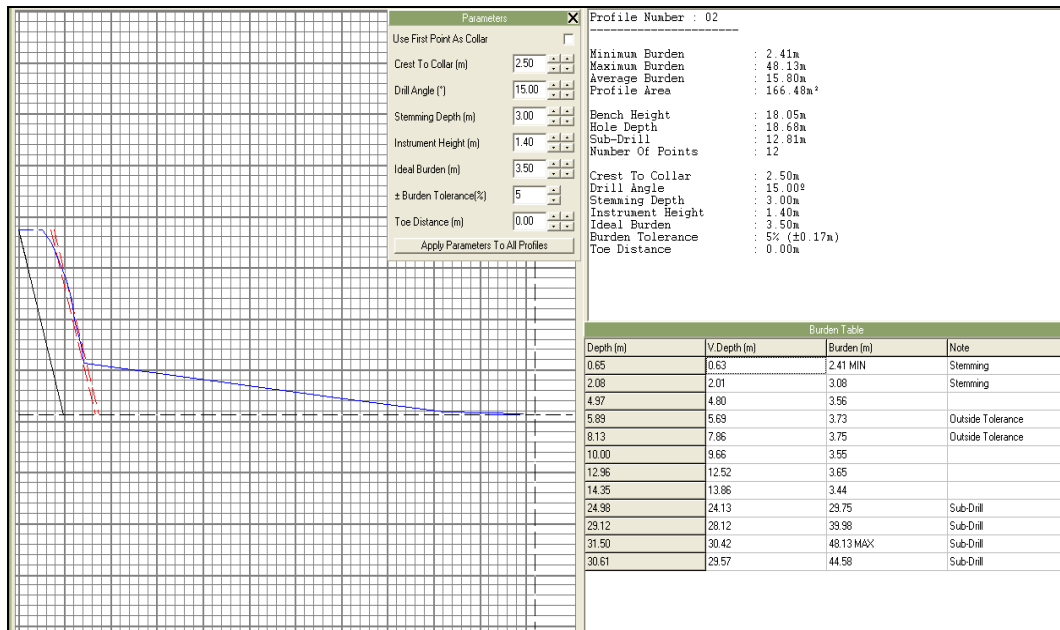


Figura 3: Ejemplo de perfil 2D de un barreno

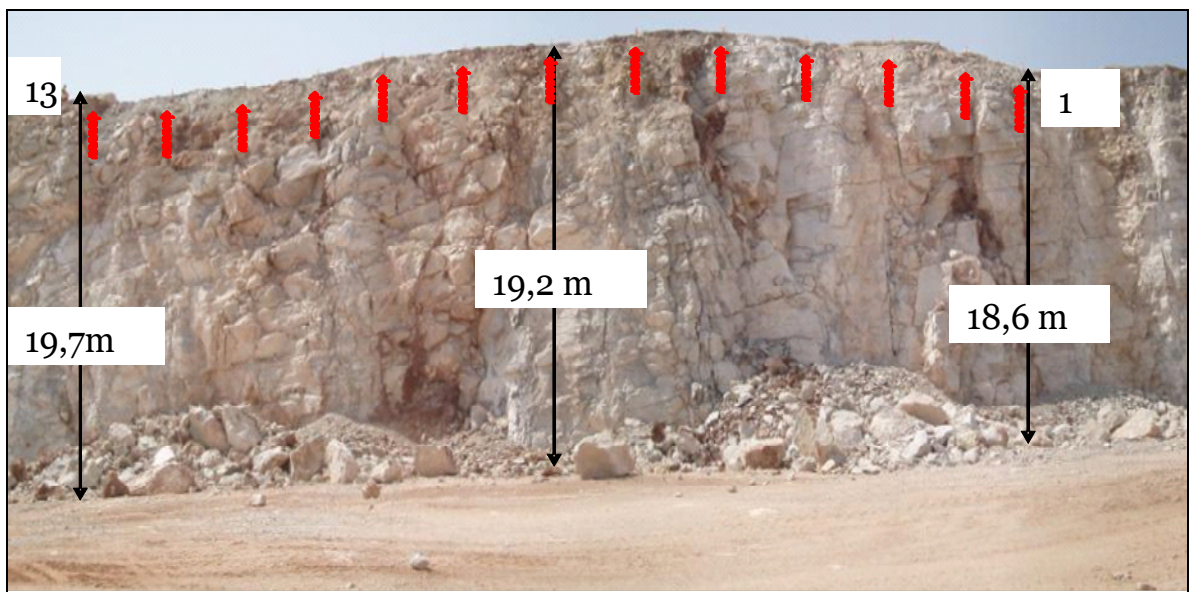


Figura 4: Posicionamiento de conos para evaluación de piedra real y altura de banco correspondiente a cada barreno de voladura

**2.5.- Perforación de barrenos** una vez marcadas las posiciones de los emboquilles y los ángulos correspondientes a cada barreno se da paso a la labor de perforación.

Esta labor es auditada regularmente para comprobar longitudes de perforación y regularidad en la malla, de manera que se comprueba la correcta implementación de los diseños marcados.

Igualmente, en épocas de lluvias, se realiza una inspección previa al pedido de explosivo para determinar la cantidad de agua dentro de cada barreno y así adaptar el tipo y cantidad de explosivo de fondo necesario.

## **2.6.- Carga de barrenos**

Como complemento a la fase de diseño, y con los datos previos de perfilometría, de perforación y de geometría del banco, el ingeniero de voladuras realiza la asistencia y el control de la carga de explosivo, retacado y secuenciación de cada voladura. Esto tiene como finalidad:

- Asegurar que el modelo simulado de voladura se lleva a cabo adecuadamente
- Elaborar documentación histórica de carga de la voladura
- Evaluar los cálculos de ajuste necesarios de cara a voladuras posteriores
- Examinar riesgos potenciales de proyecciones – control de carga explosiva por barreno y defectos de piedra en retacado
- Estudiar posibles puntos de barrenos fallidos (documentación de cuevas o dificultades de carga por atasco de barrenos)

## **2.7.- Mantenimiento de registros de voladura**

La obtención de datos y el mantenimiento de registros de voladura son fundamentales para poder evaluar una trayectoria y establecer un plan de mejora o corrección en la explotación. Sobre cada una de las voladuras se elaboran los siguientes documentos:

- Auditoria pre-perforación del banco: estratificación, cuevas, relleno en piso de banco y cantidad, geometría del frente, presencia de bloques sueltos, presencia de vetas de arcilla
- Perfilometría laser 2D con emplazamiento de marcas para perforación: indicación a perforistas de emplazamiento, grados y longitud de perforación
- Diseño de la voladura acorde a la auditoria: tiempos de disparo, cantidad de carga de fondo, cantidad de carga de columna
- Pedido de explosivo acorde con diseño
- Filmación de la voladura para examen posterior
- Control de vibraciones junto a viviendas más cercanas
- 

## **2.8.- Análisis del rendimiento (Key Performance Indicators)**

Para establecer índices de rendimiento se tomaron diferentes indicadores desde el inicio de las labores de auditoría, control y mejora de voladuras. Estas variables son:

- Número de atascos por sobretamaños en molienda primaria
- Disponibilidad de molienda primaria en relación con atascos
- Horas de atasco por cada 100 horas trabajadas en molienda primaria
- Evolución del coste de voladura según contabilidad interna de CGC
- Control de costes de maquinaria auxiliar (pica-pica, retro para repies)

## 2.9.- Perfeccionamiento del diseño

Las labores de campo y auditoria determinaron que había tres aspectos relevantes causantes de la generación de sobretamaños en voladura. Estos son:

### 2.9.1.- Geometría de la voladura y emplazamiento de la misma

Los extremos de las voladuras generan daños en su entorno. Cuando una voladura está encajonada sin dos frentes libres, produce daños en los dos lados. Nuestra propuesta de perfeccionamiento fue realizar sistemáticamente las voladuras con dos caras libres.

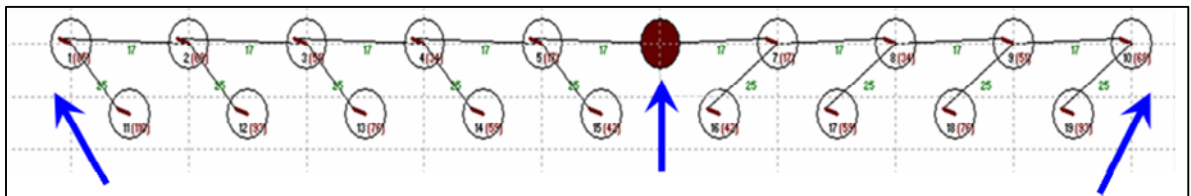


Figura 5: Iniciación habitual en voladuras antes de Agosto de 2007

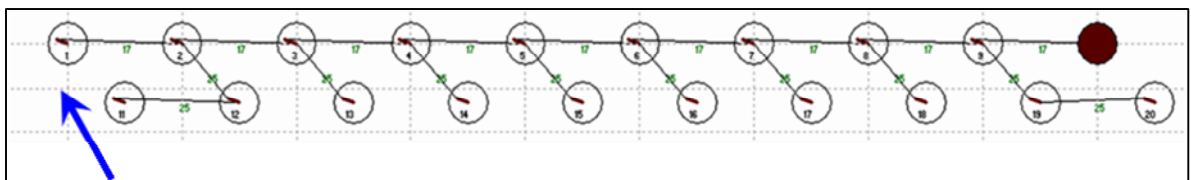


Figura 6: Iniciación propuesta con geometría de 2 caras

### 2.9.2.- Prevención de proyecciones

El programa de asistencia en voladura incluye un análisis de riesgos por proyecciones.

Estas se pueden producir en esta cantera por 3 motivos principales:

- Irregularidades en la primera fila de voladura causada por frentes irregulares (bloques desprendidos, cuevas o voladizos)
- Defecto de retacado o superficie de banco con relleno

- Vetas y/o cuevas de arcilla

Tras este análisis, las dos primeras causas fueron controladas mediante la perfilometría laser 2D y la utilización de un material de retacado clasificado (gravilla 6-12 mm) y el control exhaustivo de la longitud correcta del retacado y la manera correcta de medirlo.



*Figura 7: Material de retacado anguloso y de granulometría adecuada para 4 1/3”*

### **2.9.3.- Ajuste de la perforación para posicionar correctamente la carga de fondo**

El trabajo con palas cargadoras dificulta la obtención de niveles constantes de banco por el escaso poder de excavación de estas máquinas. En un mismo banco, pueden aparecer diferencias de hasta 2 metros en altura de banco.

Ya que la perfilometría láser nos permite conocer con exactitud la altura necesaria para cada barreno, se ha desarrollado una dinámica de ajuste de la longitud adecuada para cada barreno. Esto se comunica a los perforistas antes del comienzo de su labor, además de dejándolo indicado junto a los barrenos.

#### 2.9.4.- Prevención, detección y control de barrenos fallidos

El protocolo de trabajo de los técnicos de Blast Consult incluye:

- Asegurar la correcta carga del explosivo, de manera que, al menos, se asegure la detonación de cargas de dinamita y detonadores (los elementos más sensibles)
- Asegurar una correcta secuenciación que no dé lugar a detonación fuera de secuencia ni a deslizamiento de lisos que puedan provocar el corte de barrenos.

*Tabla 1: Resumen de variables consideradas en las voladuras en La Utrera*

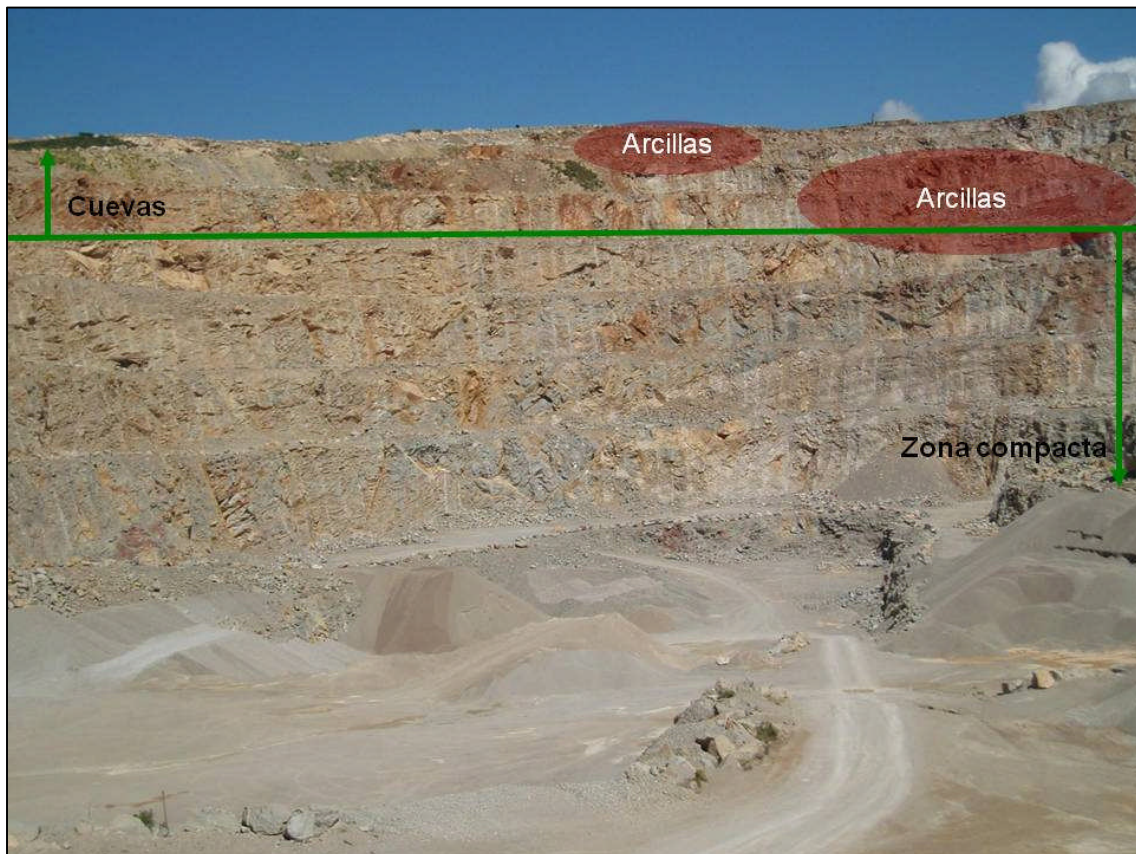
<b>Variable</b>	<b>Descripción / Acción</b>
Evaluación del lugar	Macizo blocoso de material duro con intercalación de arcilla
Diseño de la voladura: Objetivo	Máxima fragmentación. Desplazamiento adecuado para pala cargadora
Preparación del banco	Doble frente libre sistemático
Configuración de la malla	3,5 m x 4,2 m (Pacios 5 a 8) 3,75m x 4,5 m (patios 1 a 4)
Perforación de Barrenos	Indicaciones pre-perforación Auditorias esporádicas Ajuste a nivel de piso individualizado
Carga de la voladura	Según diseño Prevención de proyecciones Control de explosivo consumido por metro
Mantenimiento de Registros	Archivo individualizado por voladura
Análisis de Rendimiento	Seguimiento de disponibilidad, atranques y costes por tonelada
Perfeccionamiento del Diseño	Ajuste de carga de fondo Evolución de voladuras de escollera

#### 3.- Identificación de zonas diferenciadas

Conforme el control de las voladuras permite identificar zonas de comportamiento diferenciado frente a los explosivos, se establecieron dos tipos de mallas (Tabla 1). Así,

las partes de roca mas sana (niveles 4 a 1), sin intercalaciones de arcilla y comportamiento mas masivo, derivaron en el empleo de una malla mas abierta que minimizara los finos, manteniendo niveles de fragmentación suficientes para no producir atascos en el molino primario.

En zonas alteradas (niveles 8 a 5), sin embargo, se mantuvo el diseño de malla mas cerrado, de manera que se compensara con el incremento de energía explosiva los efectos negativos de las cuevas rellenas de arcilla.



*Figura 8: Delimitación de zonas geológicamente diferenciadas respecto a la voladura. Estas zonas pueden evolucionar con el avance de la explotación.*

#### 4.- Resultados a enero 2009

Los resultados de optimización tienen como objetivo la maximización económica de la operación minera. Bien por minimización de costes, o por incrementar producción en periodo de ventas superiores a la producción, el trabajo de ingeniería de voladuras debe cuantificarse económicamente respecto a las mejoras en los KPI.

A continuación se reflejan de diferentes maneras, y según la contabilidad interna de la compañía, la evolución de los indicadores tomados como referencias clave (KPI)

Hasta 31-ago-2007	<b>96,78 %</b>	diferencial	horas trabajadas	horas recuperadas	tn recuperadas	benef s/ventas mes	coste consultoría mes	resultado
sep-07	98,03 %	1,25%	496	6,55	1.905	5.715,53 €	1.920,00 €	3.795,53 €
oct-07	99,03 %	2,25%	653	15,35	4.500	13.499,01 €	2.400,00 €	11.099,01 €
nov-07	99,39 %	2,61%	554	15,03	4.073	12.219,69 €	2.400,00 €	9.819,69 €
dic-07	98,40 %	1,62%	407	6,94	2.142	6.426,68 €	1.920,00 €	4.506,68 €
ene-08	98,09 %	1,31%	544	7,51	2.244	6.732,26 €	2.880,00 €	3.852,26 €
feb-08	98,22 %	1,44%	525	7,97	2.382	7.144,51 €	2.400,00 €	4.744,51 €
mar-08	97,84 %	1,06%	328	3,66	1.358	4.075,33 €	1.920,00 €	2.155,33 €
abr-08	98,52 %	1,74%	423	7,73	2.627	7.879,89 €	1.920,00 €	5.959,89 €
may-08	96,47 %	-0,31%	444	-1,48	-421	- 1.261,84 €	4.240,00 €	- 5.501,84 €
jun-08	98,81 %	2,03%	378	8,03	2.392	7.177,03 €	3.180,00 €	3.997,03 €
jul-08	98,70 %	1,92%	509	10,24	3.266	9.796,85 €	5.830,00 €	3.966,85 €
ago-08	97,44 %	0,66%	407	2,84	944	2.831,61 €	3.180,00 €	- 348,39 €
sep-08	97,35 %	0,57%	468	2,82	831	2.493,72 €	3.180,00 €	- 686,28 €
oct-08	98,72 %	1,94%	490	9,97	2.833	8.498,54 €	4.240,00 €	4.258,54 €

nov-08	99,40 %	2,62%	248	6,75	2.748	8.244,48 €	2.650,00 €	5.594,48 €
dic-08	99,27 %	2,49%	205	5,32	1.921	5.763,08 €	2.650,00 €	3.113,08 €
ene-09	99,58 %	2,80%	238	6,92	2.560	7.680,62 €	2.120,00 €	5.560,62 €
								<b>65.886,99 €</b>

Nota: La disponibilidad aquí calculada tiene en cuenta solamente las incidencias debidas a atranques.

Respecto al empleo de explosivos, el ajuste exacto de la carga de fondo, los diseños ajustados a la altura de banco y el control de los detalles de la voladura han derivado en un menor desperdicio de explosivo sobrante.

Igualmente, la perfilometría láser ha permitido la práctica eliminación del empleo de zapateras, eliminando el consumo implícito en éstas. En términos reales, y SIN considerar la subida del precio de los explosivos (datos sin ajustar), la contabilidad de CGC ofrece los siguientes datos:

*Tabla 3: Ahorros en consumo de riodin*

COSTE EXPLOSIVO			precio medio goma 3,00 €		
consumo goma/tn vol	gramos/tn	g/tn	tn	tn	
acum ago 2007	<b>19,2</b>	<b>diferencial</b>	<b>tn vol mes</b>	<b>kg diferencial</b>	<b>€ ahorro</b>
sep-07	<b>22,1</b>	-2,9	97.068	-286,3	- 858,88 €
oct-07	<b>22,1</b>	-2,9	131.205	-380,9	- 1.142,59 €
nov-07	<b>18,3</b>	0,9	107.900	96,7	290,04 €
dic-07	<b>14,4</b>	4,8	100.484	479,3	1.437,88 €

					€
ene-08	<b>14,7</b>	4,5	173.737	785,8	2.357,27 €
feb-08	<b>17,6</b>	1,6	150.366	237,0	711,06 €
mar-08	<b>13,6</b>	5,6	117.988	665,4	1.996,12 €
abr-08	<b>16,4</b>	2,8	109.968	311,4	934,16 €
may-08	<b>23,2</b>	-4,0	125.810	-504,9	- 1.514,83 €
jun-08	<b>27,0</b>	-7,8	75.172	-586,1	- 1.758,24 €
jul-08	<b>17,6</b>	1,6	198.245	317,8	953,38 €
ago-08	<b>15,5</b>	3,7	97.327	360,7	1.082,08 €
sep-08	<b>12,6</b>	6,6	156.026	1.027,7	3.083,11 €
oct-08	<b>14,0</b>	5,2	180.221	932,8	2.798,46 €
nov-08	<b>12,0</b>	7,2	127.628	913,8	2.741,36 €
dic-08	<b>18,4</b>	0,8	88.380	71,9	215,66 €
					<b>13.326,03 €</b>

*Tabla 3: Ahorros en consumo de nagolita*

<b>COSTE EXPLOSIVO</b>			precio medio nagolita 1,00 €		
<b>consumo nagol/tn vol</b>	gramos/tn	g/tn	tn	tn	
acum ago 2007	<b>172,9</b>	<b>diferencial</b>	<b>tn vol mes</b>	<b>kg diferencial</b>	<b>€ ahorro</b>
sep-07	<b>170,0</b>	3,0	97.068	286,9	860,56 €
oct-07	<b>179,5</b>	-6,6	131.205	-859,5	- 2.578,57 €
nov-07	<b>189,1</b>	-16,1	107.900	-1.739,9	- 5.219,61 €
dic-07	<b>161,5</b>	11,5	100.484	1.152,6	3.457,84 €
ene-08	<b>138,1</b>	34,8	173.737	6.046,0	18.137,92 €
feb-08	<b>141,8</b>	31,1	150.366	4.679,1	14.037,28 €
mar-08	<b>136,0</b>	36,9	117.988	4.354,8	13.064,32 €
abr-08	<b>147,5</b>	25,4	109.968	2.792,8	8.378,36 €
may-08	<b>155,4</b>	17,6	125.810	2.209,4	6.628,06 €
jun-08	<b>149,4</b>	23,6	75.172	1.772,2	5.316,55 €
jul-08	<b>153,1</b>	19,9	198.245	3.942,9	11.828,67 €
ago-08	<b>154,9</b>	18,0	97.327	1.751,8	5.255,37 €
sep-08	<b>157,0</b>	15,9	156.026	2.483,0	7.449,10 €
oct-08	<b>152,5</b>	20,4	180.221	3.684,9	11.054,64 €
nov-08	<b>130,8</b>	42,1	127.628	5.372,1	16.116,17 €
dic-08	<b>153,3</b>	19,6	88.380	1.734,3	5.202,82 €
					<b>118.989,50</b>
					€

*Tabla 4: Horas de maquinaria auxiliar para eliminación de repies en banco.  
Producción NO homogenea*

<b>HORAS DE RETROEXCAVADORA</b>		
<b>repiés</b>	<b>HORAS</b>	<b>HORAS</b>
	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>ene</b>	<b>69</b>	<b>15</b>
<b>feb</b>	<b>60</b>	<b>15</b>
<b>mar</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b>abr</b>	<b>50</b>	<b>0</b>
<b>may</b>	<b>40</b>	<b>0</b>
<b>jun</b>	<b>46</b>	<b>0</b>
<b>jul</b>	<b>70</b>	<b>50</b>
<b>ago</b>	<b>141</b>	<b>21</b>
<b>sep</b>	<b>16</b>	<b>0</b>
<b>oct</b>	<b>110</b>	
<b>nov</b>	<b>0</b>	
<b>dic</b>	<b>60</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>702</b>	<b>121</b>

tabla 5: control disponibilidad mensual por atranques

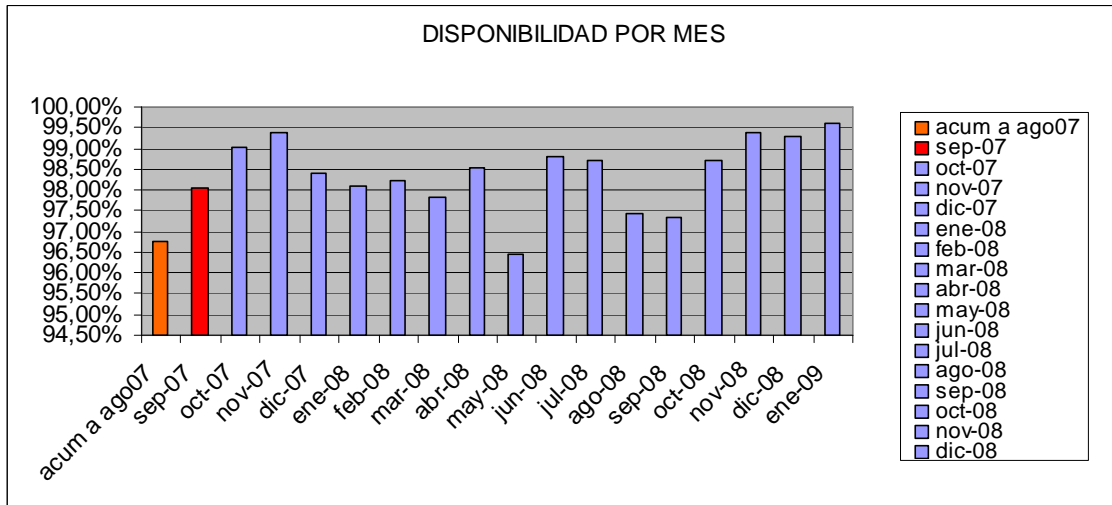
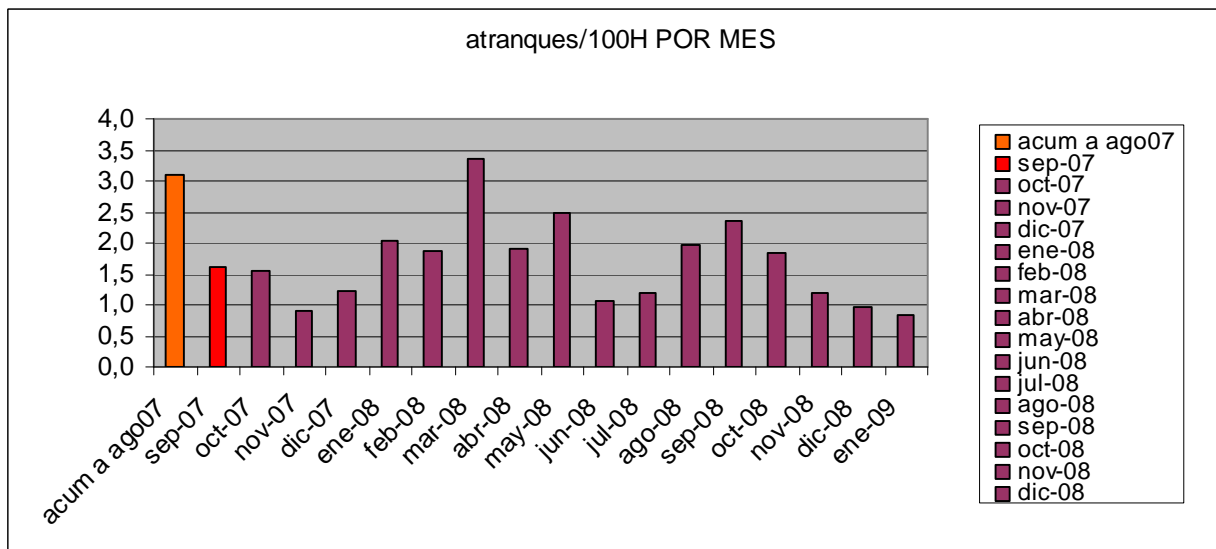


Tabla 6: números de atranques mensuales



## 6.- Conclusiones

Durante el periodo de control de 2008 se han obtenido resultados consistentes y predecibles de voladura respecto a los diseños aplicados, consiguiendo implementarse dos diseños evolucionados de voladura respecto a la optimización 1.0. Esto se ha conseguido gracias a una normalización de los frentes de voladura, una constancia en

los parámetros de piedra, espaciamiento y posicionamiento de la carga de fondo adecuado y una atención constante a los detalles de la carga de explosivo.

Los niveles de vibración se mantienen en valores en torno a 4 mm/s, con voladuras de corta duración. Aunque no se producen quejas por vibraciones, es de esperar que el acercamiento progresivo de la explotación a estructuras pueda derivar en reclamaciones, por lo que un archivo completo de registros es aconsejable.

Los fenómenos de barrenos fallidos han sido:

- Mínimos gracias a los diseños con secuenciación adecuada según fracturación del terreno y geometría NO favorable al deslizamiento de lisos
- Inocuos en los casos de nagolita detectada por filtración en grietas o discontinuidad de detonación por agua
- Marcados de manera visible y notificados a la dirección facultativa
- Sólo un caso, por desprendimiento del cordón detonante, ha sido objeto de análisis posterior en videos y diseño de voladura
- 
- Los ahorros derivados de mejora de rendimiento en planta de tratamiento y de menor consumo de explosivo en el primer semestre de 2008 han sido de **59.805,88 € siendo el ahorro histórico por estos dos factores de 137.375,2**