

UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZAN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA

E.A.P. DE INGENIERIA CIVIL



---

**“DISEÑO DE VOLADURAS PARA ROCAS CALIZAS PARA LA  
CONSTRUCCION DE PEDRAPLENES”**

---

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

(Juan Filomon Lazarte Aquino)

Asesor: Ing. Erasmo Fernández Sixto

HUANUCO - PERU

(2017)

## **DEDICATORIA**

A Dios, supremo creador de todas las cosas, por ser la luz en mis sueños y lumbrera en mi camino.

A mi Madre Lucila y mi Padre Filomon, por su apoyo incondicional, con su esfuerzo y trabajo para enseñarme a inclinar mi corazón a Dios, por cada consejo que me ha dado para alcanzar esta meta.

A mis hermanos Gino, Diana y Soledad que me han dado palabras de ánimo y gran estímulo, motivándome en el largo camino de la carrera.

A mi esposa Mariela y mi hijo Juan Diego quienes son la razón de fortaleza y determinación.

## RESUMEN

La investigación se centra en describir, proponer y diseñar los parámetros de perforación y voladura para la construcción del pedraplen, la presa de tierra de la construcción de la obra de la Central Hidroeléctrica Chaglla, y encontrar una ecuación matemática de diseño para este tipo de rocas que afloran en la zona (rocas calizas), rocas que se utilizan para el relleno de la presa en sus diferentes etapas de construcción.

Si bien no existe una forma exacta de calcular inicialmente los parámetros de perforación y voladura para una determinada cantera, sino que se selecciona un modelo matemático existente y con ello se modifican las variables viendo los resultados postvoladura, con esta investigación se quiere encontrar una ecuación que nos ayude a ello y utilizarlo en rocas de las mismas características y/o proyectos cercanos a este. Por ello se nos presenta la pregunta de investigación *Que parámetros de perforación y voladura se aplican para la explotación de canteras de rocas calizas, para la construcción del pedraplen de la Central Hidroeléctrica Chaglla?*

El procedimiento se realizó tomando datos de las voladuras realizadas en el proyecto Chaglla en todo el año 2013, donde se realizaron voladuras en diferentes frentes como Cantera 19, Cantera 20, Cantera 21, ACP18, Tramo 2, (276 voladuras en total de los frentes mencionados) que en su mayoría se utilizaron de relleno para el pedraplen, estos datos se trabajaron estadísticamente para encontrar una ecuación que relacione el burden y espaciamiento, y designar un factor de carga para el cálculo de explosivos por taladro, utilizando como carga de fondo Exsagel-E65 y EXAMON P (ANFO).

Finalmente se concluye que ningún modelo matemático existente hasta la fecha nos ofrece una medida aproximada del burden, siendo los cercanos los modelos de Ucar, Rustan y López Jimeno. Además que en las rocas calizas el factor de carga óptimo promedio es de 0.15 kg/m<sup>3</sup> (kg de explosivo por m<sup>3</sup> de roca) y la relación entre burden y espaciamiento se relaciona con la siguiente ecuación encontrada  **$S = 1.2469 B^{0.855}$** , en taladros de producción, los cuales se pueden usar para diseños posteriores ya sea en otro proyecto donde las rocas sean calizas o presenten características semejantes.

## INDICE

DEDICATORIA.....	I
RESUMEN.....	II
INDICE.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	X
Introducción.....	1
CAPÍTULO I: Planteamiento del Problema.....	2
Formulación de Problema.....	2
Objetivos.....	3
Objetivos Generales.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Justificación.....	4
Limitaciones.....	5
Limitaciones de lugar.....	5
Limitaciones de Información.....	5
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	6
Antecedentes de la investigación.....	6
Generalidades.....	8
Características de la presa .....	8
Características geológicas.....	15
Propiedades de las rocas calizas.....	16
Geomorfología.....	16
Geología regional.....	17
Resistencia dinámica a la compresión.....	18
Resistencia dinámica a la tracción.....	18
Frecuencia sísmica. ....	19

Angulo de fricción interna.....	19
Planos de estratificación.....	20
Fallas.....	21
Diaclasas.....	21
Perforación de rocas.....	22
Equipos de perforación.....	24
Manuales.....	24
Mecanizadas .....	24
Mecanizadas rotatorias .....	25
Martillos.....	26
Los soportes .....	26
Las compresoras.....	27
Brocas y barrenos.....	27
Selección de equipos de perforación.....	28
Descripción de perforadoras PWH-5000.....	29
Especificaciones técnicas de compresora altas copco XAS187.....	30
Perforadoras DX680.....	31
Condiciones de Perforación .....	33
Diámetro.....	33
Rectitud.....	33
Estabilidad.....	33
Voladura de rocas.....	34
Voladura controlada y amortiguada .....	34
Explosivos.....	37
Explosivos químicos.....	37
Altos explosivos sensibles al fulminante n° 8.....	38
Dinamitas.....	38

Gelatinas.....	40
Semigelatinas .....	41
Explosivos Hidrogel y emulsión sensibilizados.....	42
Emulsiones explosivas.....	43
Explosivos especiales.....	44
Agentes de voladura no sensible al detonador n° 8.....	44
Agentes de voladuras acuosas.....	45
Agentes mixtos (emulsion/anfo).....	46
Agentes de voladura granulares, secos.....	47
Accesorios de voladura.....	50
Mecha lenta.....	50
Fulminante simple n° 8.....	50
Conector de ignición.....	51
Mecha rápida.....	52
Detonador ensamblado .....	53
Cordón detonante.....	54
Booster .....	55
Retardo de superficie .....	56
<b>CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO.....</b>	<b>59</b>
Alcance de investigación.....	59
Diseño de investigación .....	59
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>60</b>
Diseño de perforación .....	60
Modelo matemático de Ash .....	62
Modelo matemático de Pearse .....	62
Modelo matemático de Konya .....	64
Modelo matemático de Andersen.....	64

Modelo matemático de Fraenkel.....	65
Modelo matemático de Ucar.....	65
Modelo matemático de foldesi.....	66
Modelo matemático de Rustan .....	67
Modelo matemático de López Jimeno.....	67
Cálculos con los modelos para D=2.5 pulg. ....	69
Cálculos con los modelos para D=3.0 pulg. ....	75
Cálculos con los modelos para D=3.5 pulg. ....	82
Indicadores de perforación y voladura.....	89
Ecuación de correlación de burden y espaciamiento .....	102
Diseño de proyecto de voladura .....	107
Calculo del tiempo de retardo de barreno a barreno.....	109
Calculo de tiempo de retardo entre filas .....	109
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
Conclusiones.....	111
Recomendaciones.....	112
Bibliografía.....	113
Anexos .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Imagen n° 2.0 : Localización del proyecto Hidroeléctrico Chaglla.....	8
Imagen n° 2.1 : Características de material de presa.....	9
Imagen n° 2.2 : Curva Granulométrica material 2A .....	9
Imagen n° 2.3: Curva Granulométrica arena de instrumentación.....	10
Imagen n° 2.4: Curva granulométrica tipo 2B.....	10
Imagen n° 2.5: Curva Granulométrica Material 3B, Lluto.....	11
Imagen n° 2.6: Curva granulométrica material 3B, Puente presa.....	11
Imagen n° 2.7: Curva Granulométrica de Material 3B. Cantera n°3.....	12
Imagen n° 2.8: Curva Granulométrica Material 3B, Vertederos.....	12
Imagen n° 2.9: Curva Granulométrica Material 3B, rio Huallaga.....	13
Imagen n° 2.10: Curva granulométrica material 3D.....	13
Imagen n° 2.11: Curva granulométrica material 3A.....	14
Imagen n° 2.12: Curva granulométrica material 3B, Jaupar.....	14
Imagen n° 2.13: Curva granulométrica material 2D.....	15
Imagen n° 2.14: Estratificación de la cantera n° 19.....	20
Imagen n° 2.15: Estratificación de la caliza del ACP 18.....	21
Imagen n° 2.16: Estratificación de la caliza del ACP 18 y shaf.....	21
Imagen n° 2.17: Diaclasas en los estratos de la cantera n° 19.....	23
Imagen n° 2.18: Diaclasas en los estratos Jaupar.....	24
Imagen n° 2.19: Mecanismos de perforación.....	23
Imagen n° 2.20: Track drill perforando taladros de producción.....	24
Imagen n° 2.21: Rock drill DX 680.....	25
Imagen n° 2.22: Rock Drill DX 680 en perforación secundaria.....	25
Imagen n° 2.23: Martillo Neumático RH.....	26
Imagen n° 2.24: Compresora Atlas Copco.....	27
Imagen n° 2.25: Rock drill DX 700.....	32



Imagen n° 2.26: Mecánica de corte linear en voladura controlada.....	36
Imagen n° 2.27: Emulsión EXSA.....	44
Imagen n° 2.28: Anfo EXSA.....	48
Imagen n° 2.29: Fulminante n° 8.....	51
Imagen n° 2.30 Conector de Ignición.....	52
Imagen n° 2.31: Mecha Rápida EXSA.....	53
Imagen n° 2.32: Detonador ensamblado.....	54
Imagen n° 2.33: Cordón Detonante 5G.....	55
Imagen n° 2.34: Retardo bidireccional 42 ms.....	57
Imagen n° 2.35: Retardo Bidireccional 75 ms.....	57
Imagen n° 2.36: Retardo Bidireccional 300 ms.....	58
Imagen 4.0: Nomenclatura de voladura de bancos.....	60
Imagen 4.1: Tipos de taladros en Voladura de banco .....	61
Imagen 4.2: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=2.5 pulg.....	89
Imagen 4.3: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.0 pulg .....	90
Imagen 4.4: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.5 pulg.....	91
Imagen 4.5: Indicadores de perforación y voladura por diámetro ACP18.....	92
Imagen 4.6: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 CANTERA 21 .....	93
Imagen 4.7: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA 19.....	94
Imagen 4.8: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg CANTERA 19.....	95
Imagen 4.9: Indicadores de perforación y voladura D=3.5 pulg CANTERA 19.....	95
Imagen 4.10: Indicadores de perforación y voladura por diámetro CANTERA 19.....	96

Imagen 4.11: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA20	97
Imagen 4.12: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg CANTERA 20	98
Imagen 4.13: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg TRAMO 2	99
Imagen 4.14: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg TRAMO 2	100
Imagen 4.15: Factor de carga promedio anual por frentes	102
Imagen 4.16: Relación de puntos burden y espaciamento para ACP18	102
Imagen 4.17: Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA19	103
Imagen 4.18: Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA20	103
Imagen 4.19: Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA21	104
Imagen 4.20: Relación de puntos burden y espaciamento para TRAMO2	104
Imagen 4.21: Relación de puntos burden y espaciamento para todos los frentes datos del año 2013	105
Imagen 4.22: vista en perfil y planta de un proyecto de voladura	106
Imagen 4.23: Diseño de taladros de producción para los diferentes diámetros	108
Imagen 4.24: distribución de retardos	110

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.0: Características de las rocas.....	18
Tabla 2.1: Frecuencia sísmica de las rocas más comunes.....	19
Tabla 2.2: Angulo de fricción interna de las rocas sedimentarias.....	20
Tabla 2.3: Especificaciones técnicas, compresora Altas copco.....	30
Tabla 2.4: Especificaciones técnicas track drill.....	31
Tabla 2.5: Especificaciones técnicas rock drill.....	32
Tabla 2.6: Componentes de los explosivos.....	49
Tabla 2.7: Características de los explosivos EXSA.....	49
Tabla 2.8: Porcentaje de energía de los explosivos EXSA.....	49
Tabla 2.9: Especificaciones técnicas de la mecha de seguridad.....	50
Tabla 2.10: especificaciones técnicas del fulminante N°8.....	51
Tabla 2.11: Especificaciones técnicas del conector de ignicion.....	52
Tabla 2.12: Especificaciones técnicas de mecha rápida.....	53
Tabla 2.13: Especificaciones técnicas de detonador ensamblado.....	54
Tabla 2.14: Especificaciones técnicas cordón detonante.....	55
Tabla 2.15: Especificaciones técnicas Booster.....	56
Tabla 2.16: Características de retardos bidireccionales.....	58
Tabla 2.17: Características de los explosivos EXSA.....	58
Tabla 4.0: Tabla para estimar la constante Kb.....	62
Tabla 4.1: Factor de Correccion de Pearse.....	63
Tabla 4.2: Índice de calidad de roca.....	63
Tabla 4.3: Tabla de diseño de López Jimeno.....	67

Tabla 4.4: Parámetros de diseño para D=2.5 pulg. ....	88
Tabla 4.5: Parámetros de diseño para D=3.0 pulg. ....	88
Tabla 4.6: Parámetros de diseño para D=3.5 pulg. ....	88
Tabla 4.7: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=2.5 pulg .....	89
Tabla 4.8: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.0 pulg.....	90
Tabla 4.9: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.5 pulg.....	90
Tabla 4.10: Indicadores de perforación y voladura por diámetro ACP18.....	91
Tabla 4.11: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA 21.....	93
Tabla 4.12: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA 19.....	94
Tabla 4.13: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg CANTERA 19.....	94
Tabla 4.14: Indicadores de perforación y voladura D=3.5 pulg CANTERA 19 .....	95
Tabla 4.15: Indicadores de perforación y voladura por diámetro CANTERA 19 .....	96
Tabla 4.16: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA20.....	97
Tabla 4.17: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg CANTERA 20.....	98
Tabla 4.18: Indicadores de perforación y voladura por diámetro CANTERA 20 .....	99
Tabla 4.19: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg TRAMO 2.....	99
Tabla 4.20: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg TRAMO 2.....	100
Tabla 4.21: Indicadores de perforación y voladura por diámetro TRAMO 2.....	101
Tabla 4.22: Indicadores de perforación y voladura por frentes de trabajo.....	101
Tabla 4.23: Burden y Espaciamiento promedio por frentes de trabajo.....	101

Tabla 4.24: Constante de retardo barreno a barreno.....109

Tabla 4.25: Factor de tiempo entre filas.....109



## INTRODUCCIÓN

Generalmente las voladuras de rocas son actividades cíclicas cuyos cálculos de burden y factor de carga variables fundamentales en el diseño de malla de perforación, y voladura respectivamente están representadas en modelos matemáticos, que son elegidas a criterio del diseñador formulas empíricas establecidas hasta ahora, que solo dan una aproximación de los parámetros de perforación y voladura, ya que después de realizar los disparos estos parámetros se van ajustando de acuerdo a los resultados que se obtienen en campo y mediante coeficientes de factor de carga y poder para establecer un cálculo más próximo, y mediante este ajuste se llega a un diseño óptimo para cada mina y/o cantera.

La construcción del pedraplen, la presa de tierra de la CENTRAL HIDROELECTRICA CHAGLLA que es una presa de enrocado con cara de concreto, está constituido por material rocoso y finos, con un volumen total de 8 millones de m<sup>3</sup>, cuyo material rocoso en su mayoría es abastecida por la voladura de roca de las canteras de calizas definidas en la zona del proyecto.

Para poder establecer las variables de diseño óptimo de perforación y voladura se ajustan de los resultados de las voladuras previas, ya que las rocas varían sus propiedades de una cantera a otra básicamente sus estratificación y bandeamiento y presencia de finos entre estrato y estrato.

Los explosivos usados en el proyecto son de la fábrica EXSA cuyas propiedades y aplicaciones también se describe así como el criterio de selección de explosivos. Cuya cantidad de carga básicamente se calcula de acuerdo a su porcentaje de energía y densidad.

Para el cálculo de la cantidad de explosivo es fundamental el parámetro de factor de carga que es calculada de voladuras previas y se ajusta viendo los resultados de la postvoladura.



## CAPITULO I

### **Planteamiento del Problema**

La aplicación de voladuras es común en las construcciones de obras civiles y minería, en la ingeniería civil se aplicada en obras viales (carreteras, túneles) obras hidráulicas (canales de riego, presas, acueductos, galerías, alcantarillas, rompeolas) etc. Dependiendo del trabajo que se quiera realizar para atacar o utilizar la roca.

En minera solo se busca una granulometría apta para la chancadora y una distribución para carguío, en cambio en cada aplicación de obras civiles se necesita material rocoso o granular con características ya definidas de granulometría y resistencia y obtenerlo a través de la voladura demanda un estudio de parámetros de perforación y voladura.

Las voladuras aplicadas en general no obedecen a un método único y definido ya que las rocas y sus propiedades varían en cada caso y no es un material homogéneo de acuerdo a las condiciones geológicas y litológicas de este, así las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas tendrán un comportamiento diferente ante los agentes de perforación y voladura, así también las sedimentarias conglomerados, areniscas, pizarras, **calizas**, dolomitas también tienen diferentes comportamientos y comportamiento a los agentes de voladura, en la investigación se estudiara el comportamiento de las rocas calizas que afloran en la construcción del proyecto central hidroeléctrica Chaglla.

### **Formulación del Problema**

En base al planteamiento anteriormente descrito se formula la siguiente interrogante:

Que parámetros de perforación y voladura se aplican para la explotación de canteras de rocas calizas, para la construcción del pedraplen de la Central Hidroeléctrica Chaglla?



## Objetivos

### Objetivos Generales

1. Describir y proponer y diseñar los parámetros de perforación y voladura en las canteras de rocas calizas, para taladros de producción, de la construcción del pedraplen del proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla.

### Objetivos Específicos

1. Definir los parámetros físicos y mecánicos de las rocas calizas presentes en la zona del proyecto.
2. Describir los tipos de explosivos a utilizar en las voladuras y sus criterios de selección.
3. Indicar cuál de las fórmulas matemáticas de diseño de voladuras se aproxima en el cálculo de los parámetros de perforación y voladura.
4. Describir los tipos de voladura en tajo abierto sus características y aplicaciones.





### Justificación

La voladura no es solo una actividad aplicada en la minería también en la ejecución de obras civiles desde inicios del siglo XX, ya que es una manera más eficiente en tiempo y dinero de poder atacar el macizo rocoso.

Y proponer los parámetros de aplicación para un diseño que permita lograr resultados óptimos tanto en producción, calidad y seguridad, minimizando costos tanto en perforación, voladura, selección y carguío de material es fundamental en obras que impliquen voladura y tipo de material a explotar, ya que la voladura convencional se ha mejorado a través del tiempo con las teorías de mecánica de rotura de rocas, existiendo varios métodos y/o modelos matemáticos de diseño de voladuras que han ido evolucionando a través de la historia. En la actualidad existen muchos de métodos de voladura en tajo abierto y subterráneo como la voladura controlada que es fundamental en protección de taludes y en voladuras cercanos a viviendas y/o estructuras importantes.

En las estructuras de tierra o roca propiamente dicha el material debe ser adecuado para la construcción cumpliendo los estándares de calidad que se requiere en el proyecto, conseguir este material en canteras y listo para su producción es a veces muy difícil encontrarlo, por ello se debe recurrir a seleccionarlos después de realizado el disparo de la voladura de rocas para poder cumplir con la necesidad de material en obra.

Debido a ello esta investigación recopila la información de las actividades realizadas en el proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla, con fines de tener parámetros establecidos para cálculos en otros proyectos de nuestra zona ya sea en obras civiles o minería, ya que en mi experiencia he visto realizar voladuras en trabajos con ningún criterio en la aplicación de los trabajos de manipulación de explosivos.



## Limitaciones

### Limitación de lugar

El siguiente trabajo de investigación presenta los límites de geográficamente en la cuenca del río Huallaga, en donde se ubica el proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla, cuya limitación abarca tanto las propiedades geomecánicas de las rocas, ya que las rocas no presentan propiedades homogéneas sino que varían de acuerdo al tipo de roca y las características que estas presentan.

### Limitaciones de información

Las limitaciones que existen y que dificultan la elaboración de esta investigación son básicamente La carencia de información, tanto impresa como virtual; y además que la mayoría de la información que se obtiene y se encuentra es en el idioma inglés ya que son muy pocas que se pueden obtener en español.



## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### Antecedentes de la Investigación

**(Manual de Voladura de Exsa, pag.52)** En estas rocas el espesor del bandeamiento varía de acuerdo al tiempo de acumulación y la naturaleza de origen. Cuanto más masivas sean y cuanto más definido y amplio el bandeamiento, más difíciles son de volar eficientemente. La perforabilidad dependerá más de sus propiedades abrasivas que de su misma dureza. Algunas areniscas y calizas pueden presentar problemas difíciles de voladura. En particular, las rocas de grano grueso con una matriz débil requieren consideraciones especiales porque en los disparos tienden más a compactarse o abovedar antes que a romperse claramente.

**(Manual Práctico de Voladura de Rocas – EXSA, Pag-147)** De acuerdo a los criterios de la mecánica de rotura, la voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

El primero se refiere al tamaño de los fragmentos producidos, a su distribución y porcentajes por tamaños, mientras que el segundo se refiere al movimiento de la masa de roca triturada. Una adecuada fragmentación es importante para facilitar la remoción y transporte del material volado y está en relación directa con el uso al que se destinará este material, lo que calificará a la “mejor” fragmentación.

Así, en la explotación de minerales se busca preferentemente fragmentación menuda, que facilita los procesos posteriores de conminación en las plantas metalúrgicas, mientras que en la de rocas algunas veces se requiere que sea en grandes bloques, como los que se emplean para la construcción de ataguías o rompeolas. El desplazamiento y la forma de acumulación del material volado se proyecta de la manera más conveniente para el paleo o acarreo, de acuerdo al tipo y dimensiones de las palas y vehículos disponibles.

Teniendo en cuenta los diversos criterios que involucra un trabajo de voladura, como el propósito o uso final del lugar a excavar o el del material a obtener el



volumen a ser excavado, el grado de fragmentación promedio requerido, si la roca excavada se quedará in situ o será transportada a otro lugar, el tipo y la dimensión del equipo de remoción y acarreo disponible, la proximidad a instalaciones importantes que puedan ser afectadas por vibraciones o proyecciones, además de otros, es pues necesaria una planificación cuidadosa de la voladura considerando todos los detalles que puedan influir en sus resultados.

Existe una serie de factores o variables que intervienen directa o indirectamente en la voladura, que son mutuamente dependientes o que están relacionados uno u otro; unos son controlables y otros no.

Son controlables, por ejemplo, las variables de diseño, de perforación o del explosivo a emplear, mientras que no podemos modificar la geología o las características de la roca.

Para facilidad de interpretación se resume a estos factores afines en grupos, que suelen denominarse variables, factores, parámetros o condiciones fundamentales que comprenden.

El resultado de la voladura de rocas es muy variable dependiendo de muchos factores y parámetros que puedan afectar la actividad el comportamiento geomecánico de las rocas y así como las variables de perforación y voladura.

***(Manual de Perforación y Voladura de Rocas- Instituto Tecnológico GeoMinero de España-Pag.209)*** Desde la década de los años 50, se han desarrollado diversas teorías para explicar el comportamiento de las rocas bajo los efectos de una explosión, siendo aún hoy uno de los problemas a resolver y definir en la tecnología de aplicación de los explosivos al arranque. Prescindiendo de un análisis detallado de cada una de esas teorías, se describen seguidamente los distintos mecanismos de rotura de la roca identificados en las voladuras en el estado actual de conocimiento.

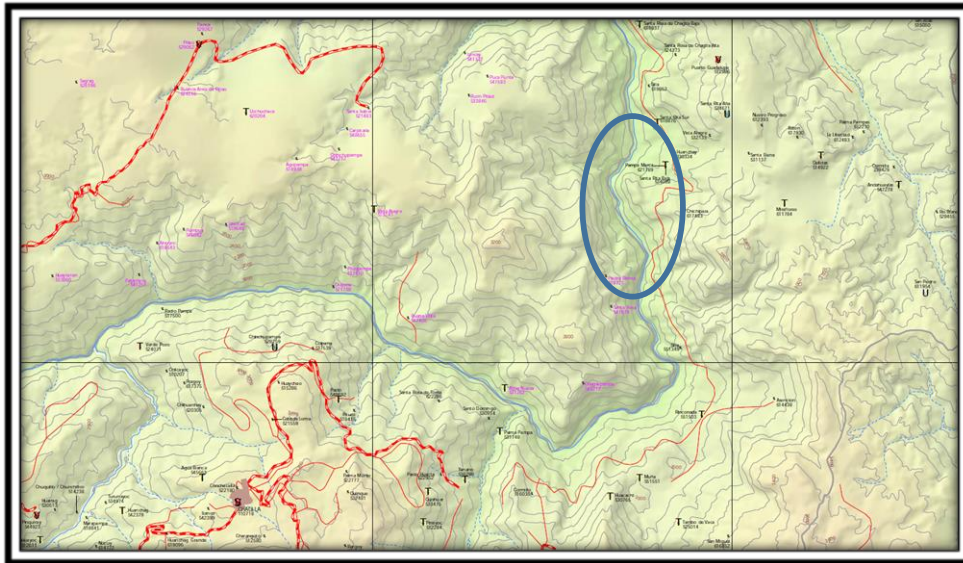


## Generalidades

### Lugar de aplicación.

La aplicación de la voladura se encuentra en la cuenca del río Huallaga en el centro poblado de Pampamarca, Huanipampa y Chulla, la última zona de ubicación de la presa de enrocado con cara de concreto.

**Imagen N° 2.0:** Localización del proyecto Hidroeléctrico de Chaglla.



Fuente: Imagen tomado de Google Maps.

### Características de la presa.

El cuerpo de la presa está constituido en su mayor parte por un relleno de material obtenido de voladuras, compactado en capas, rocas de diferentes características de tamaño según su diseño. Los materiales a utilizar para el relleno de presa varían desde finos hasta material bolón.

El pedraplen o la presa de una altura de 200m y un volumen de 8 millones de m<sup>3</sup> y la ataguía de protección de 60 m están construida a base de relleno de roca y tierra compactada con rodillo en capas según sus especificaciones técnicas de la obra.

A continuación se muestra las diferentes características de los materiales requeridos para la presa con su respectiva zona según planos del proyecto.



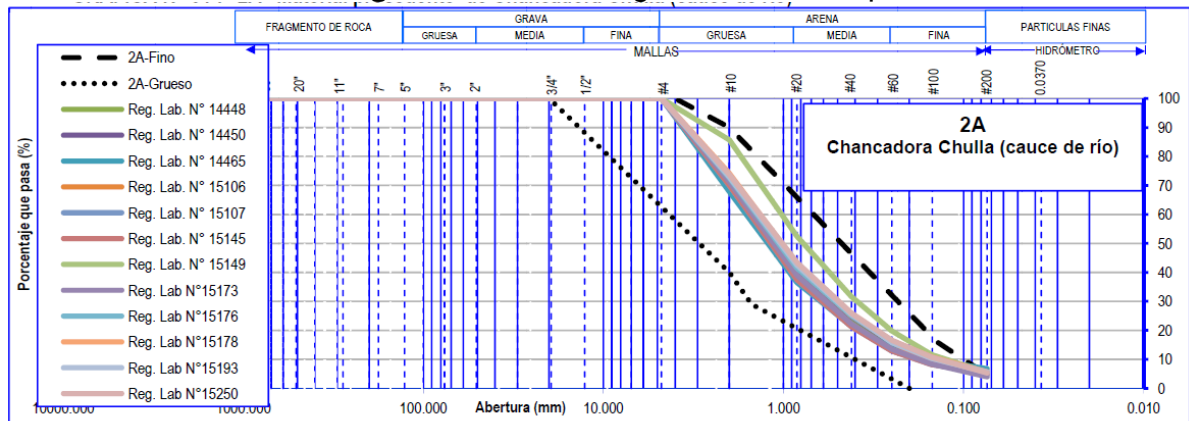
**Imagen N° 2.1: Características de material de presa.**

TABLA DE MATERIALES Y ZONEAMIENTO DE LA PRESA				
ZONA	MATERIAL	Ø MAX. (cm)	FINOS %	ESPESOR DE CAPA (cm)
1A	SUELO LIMOSO FINAMENTE ARENOSO O FINOS DE TRITURACIÓN+ARENA FINA, NO PLÁSTICOS	0,1	-	25 (SUELTA)
1B	RANDON	20,00	SIN FINOS	40 (SUELTA)
2A	FILTRO DE TRITURACIÓN GRADUADA	2,00	<5%	40,00
2B	TRANSICIÓN UNICA	10,00	<8%	40,00
3A	ENROCAMIENTO DE ROCA SANA	35,00	<10%	* 40,00
3B'	GRAVAS NATURALES DEL CAUCE	50,00	<8%	* 60,00
3B	ENROCAMIENTO DE ROCA SANA	50,00	<8%	* 60,00
3C	ENROCAMIENTO DE ROCA SANA	70,00	<5%	* 80,00
3C'	ENROCAMIENTO DE ROCA SANA	35,00	<5%	40,00
3Ca	ENROCAMIENTO CON FINOS	70,00	<10%	* 80,00
3D	ENROCAMIENTO DE ROCA SANA	70,00	<8%	* 80,00
3E	ENROCAMIENTO FINO	30,00	<5%	60,00
4	BLOQUES DE ROCA SANA ARREGLADAS EN LA CARA DE AGUAS ABAJO CON CARA MÁS ANCHA EN LA HORIZONTAL	120,00	-	-
F	FILTER	20,00	<5%	40,00
T	COLÓVIO ARENO GRAVOSO	35,00	<15%	* 40,00

*Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT*

A continuación se muestran las curvas granulométricas y de los diferentes tipos de materiales, ensayos realizados en la construcción de la Central Hidroeléctrica Chaglla por el área de calidad.

**Imagen N° 2.2: curva granulométrica tipo 2A**

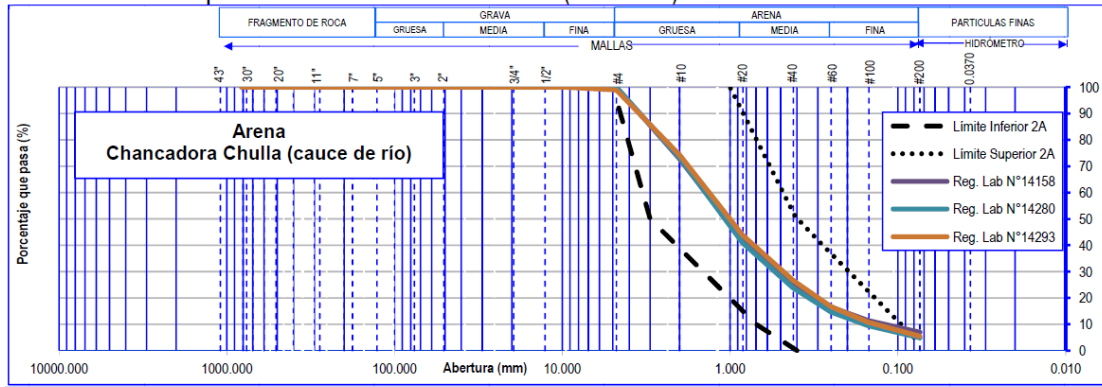


PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 2A DE CHANCADORA CHULLA (CAUCE DE RÍO)													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas (Total)	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad		Granulometría						
					Matsuo - Akai (cm/s)	Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
12	2182	6.56	2047	-	-	0	94.6	5.4	1.4	0.5	0.1	9.6	1.4

*Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT*



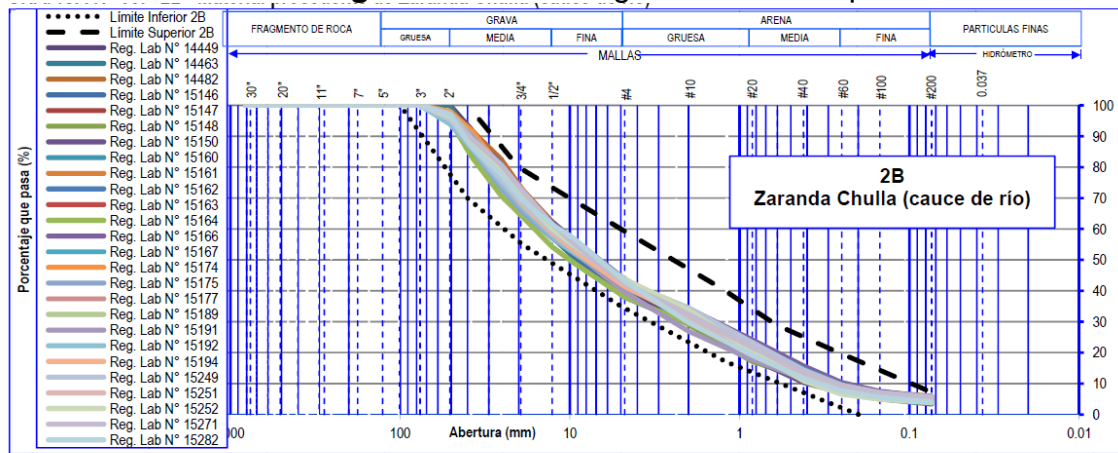
**Imagen N° 2.3: curva granulométrica arena para instrumentación**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - ARENA DE CHANCADORA CHULLA (CAUCE DE RÍO)													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
Total	2086	5.60	1975	-	-	-	94.2	5.8	1.4	0.5	0.6	10.7	1.4

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

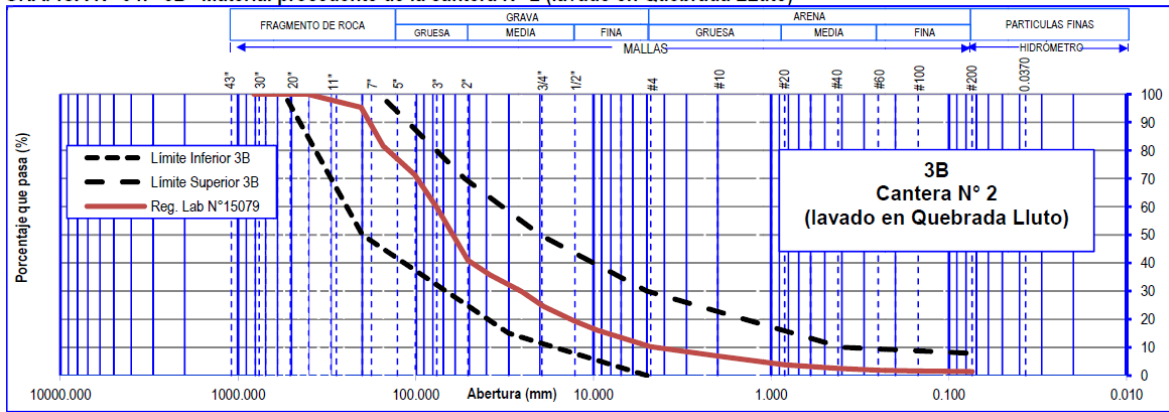
**Imagen N° 2.4: curva granulométrica tipo 2B**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 2B DE ZARANDA CHULLA (CAUCE DE RÍO)													
PEDRAPLEN													
Total N° de Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
26	2374	5.88	2207	-	-	58.2	37.2	4.7	13.0	1.7	0.3	43.2	0.8

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

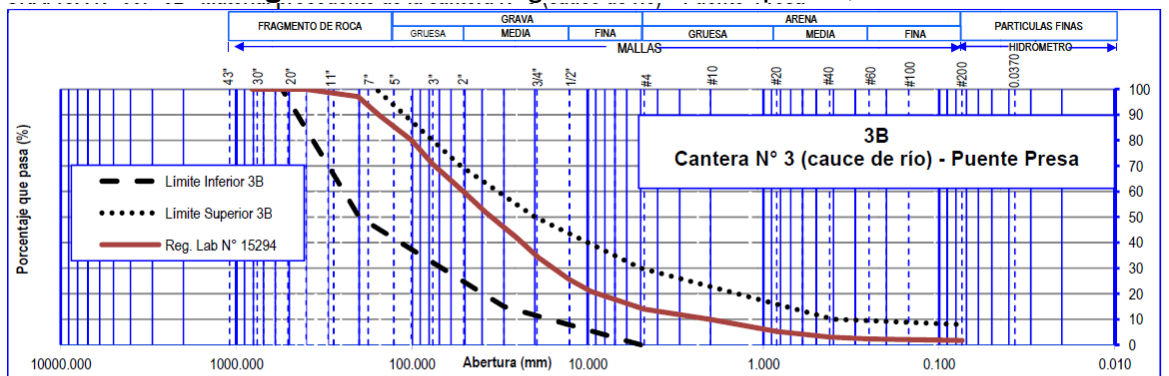
**Imagen N° 2.5: curva granulométrica tipo 3B, Lluto**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3B DE CANTERA N°2 (LAVADO EN QUEBRADA LLUTO)													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda	Contenido de Humedad	Densidad Seca	Índice de Vacíos corregido	Permeabilidad	Granulometría							
						Matsuo - Akai	Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu
(Total)	(kg/m³)	(%)	(kg/m³)	(adm)	(cm/s)								
1	2228	3.20	2159	0.2391	-	89.8	8.8	1.4	76.9	25.3	1.5	17.1	1.9

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

**Imagen N° 2.6: curva granulométrica tipo 3B, Puente Presa**

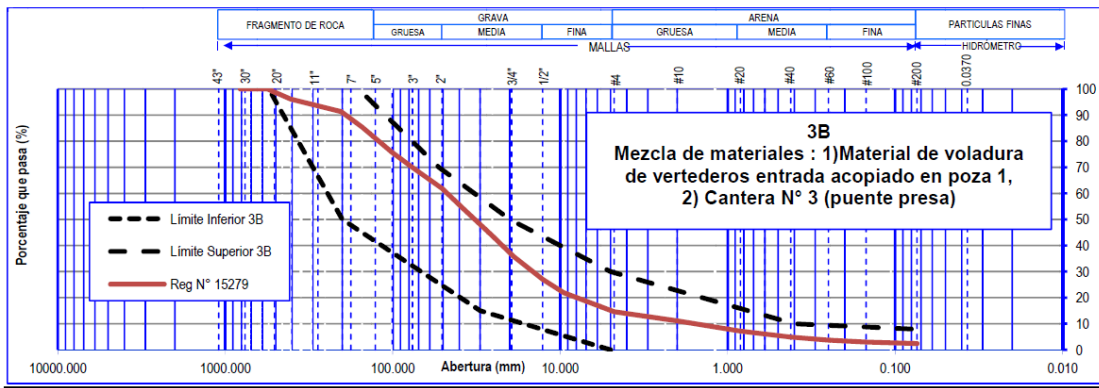


PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3B DE CANTERA N°3 (CAUCE DE RÍO) – PUENTE PRESA													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda	Contenido de Humedad	Densidad Seca	Índice de Vacíos corregido	Permeabilidad	Granulometría							
						Matsuo - Akai	% de Grava (Pass)	% de Arena (Pass)	% de Finos(<200) (Pass)	D60	D30	D10	Cu
(Total)	(kg/m³)	(%)	(kg/m³)	(adm)	(cm/s)								
1	2295	5.20	2182	0.2408	-	86.1	12.2	1.7	51.0	16.0	2.1	24.7	2.4

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT



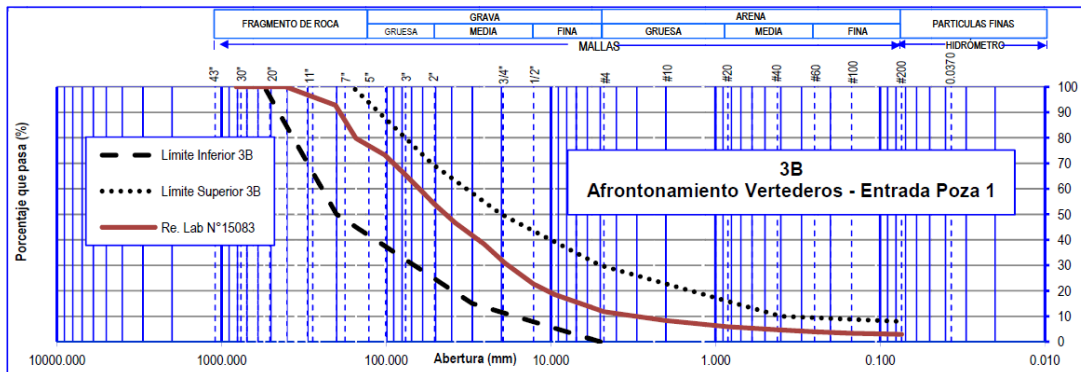
**Imagen N° 2.7: curva granulométrica tipo 3B**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3B MEZCLA DE MATERIALES													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas (Total)	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						Grava (%)	Arena (%)	Finos (<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
1	2283	4.50	2184	0.2388	-	85.4	12.2	2.4	47.6	14.5	1.5	32.3	3.0

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

**Imagen N° 2.8: curva granulométrica tipo 3B**

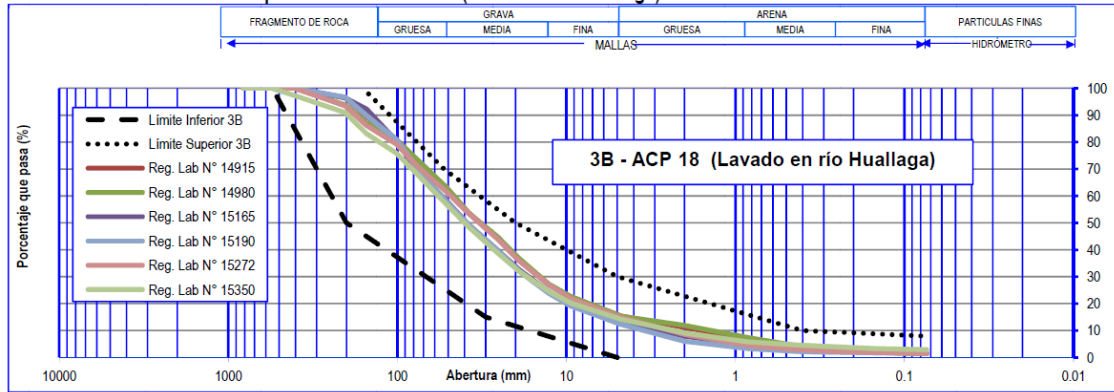


PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3B AFRONTAMIENTO VERTEDEROS - ENTRADA POZA 1													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas (Total)	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						% de Grava (Pass)	% de Arena (Pass)	% de Finos (<200) (Pass)	D60	D30	D10	Cu	Cc
1	2344	4.80	2237	0.2088	-	88.2	8.9	2.9	63.0	18.2	3.1	20.1	1.7

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT



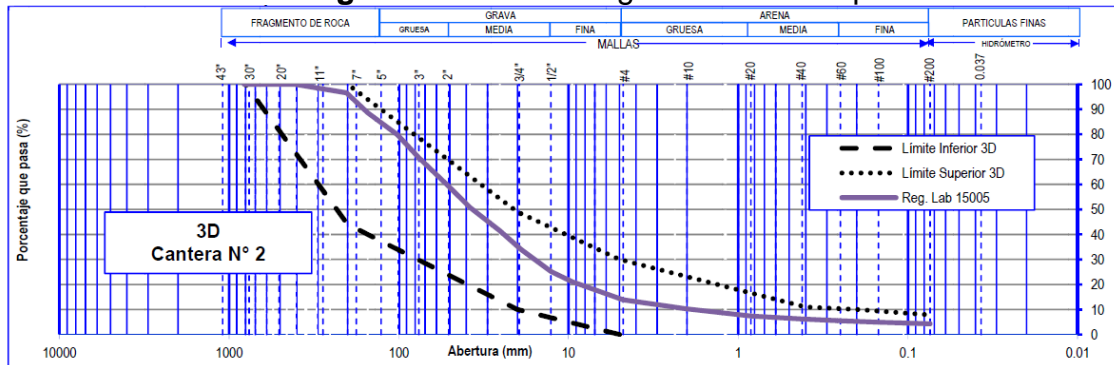
**Imagen N° 2.9: curva granulométrica tipo 3B**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3B ACP 18 (LAVADO EN RIO HUALLAGA)													
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	PERDAPLEN		Granulometría						
					Permeabilidad		D60	D30	D10	Cu	Cc		
					Matsuo - Akai (cm/s)	% de Grava (Pass)						% de Arena (Pass)	% de Finos(<200)
Total	2280	4.32	2186	0.2372	4.980X10 <sup>-1</sup>	85.8	12.5	1.7	51.4	15.8	2.4	23.4	2.2

*Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT*

**Imagen N° 2.10: curva granulométrica tipo 3D**



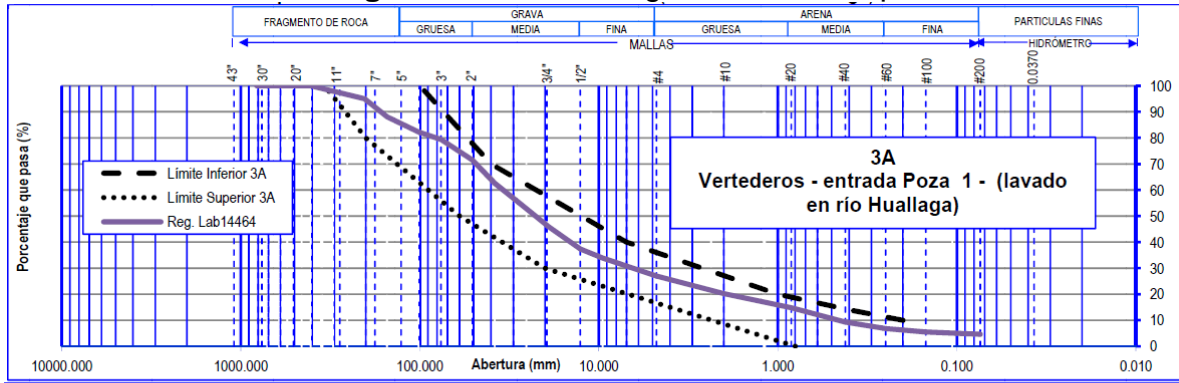
PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - 3D CANTERA N° 2														
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos (adm)	PERDAPLEN		Granulometría							
					Permeabilidad		D60	D30	D10	Cu	Cc			
					Matsuo - Akai (cm/s)	Grava (%)						Arena (%)	Finos(<200)	
(Total)	2262	4.00	2114	0.2630	-	86.10	9.60	4.30	52.96	15.56	1.82	29.10	2.50	
Julio	Cantidad	39	39	39	39	5	39	39	39	39	39	39	39	39
	Media	2225	4.11	2130	0.2608	-	88.1	9.5	2.4	67.9	25.4	5.6	20.4	2.3
	Desv. Est	66.94	1.38	48.78	0.02	-	4.28	3.50	1.17	29.82	19.28	8.93	9.26	1.27

PROMEDIO DEL MATERIAL 3D - CANTERA N° 2									
Calas ejecutadas	Densidad Aparente (kg/m³)	Absorción (%)	Peso Especifico de # 4-1" (kg/m³)	Peso Especifico de 1" - 2" (kg/m³)	Peso Especifico >2" (kg/m³)	Densidad aparente de pasante de la 4.75 mm (kg/m³)	Abrasión (Los Angeles) (%)	Durabilidad (MgSO <sub>4</sub> ) (%)	Resistencia a la compresión (kgf/cm²)
(Total)	-	-	2663	2661	2677	2674	22	-	2940
Promedio del Peso Especifico			2669						

*Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT*



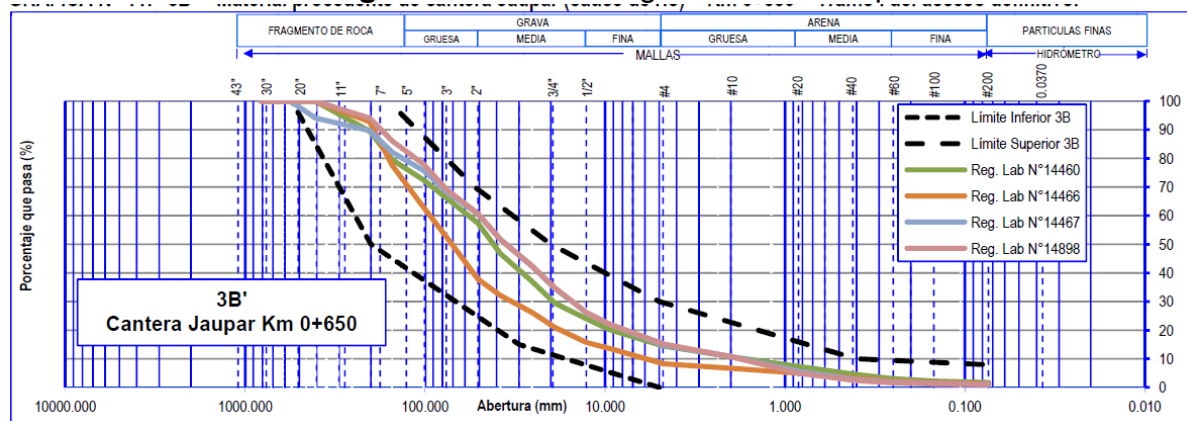
**Imagen N° 2.11: curva granulométrica tipo 3A**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - "3A" VERTEDEROS ENTRADA POZA 1 (LAVADO EN RIO HUALLAGA)													
PEDRAPLEN													
Total N° de Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						% de Grava (Pass)	% de Arena (Pass)	% de Finos(<200) (Pass)	D60	D30	D10	Cu	Cc
1	2429	4.90	2316	0.1742	-	73.0	22.4	4.6	33.9	6.1	0.5	74.8	2.4

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

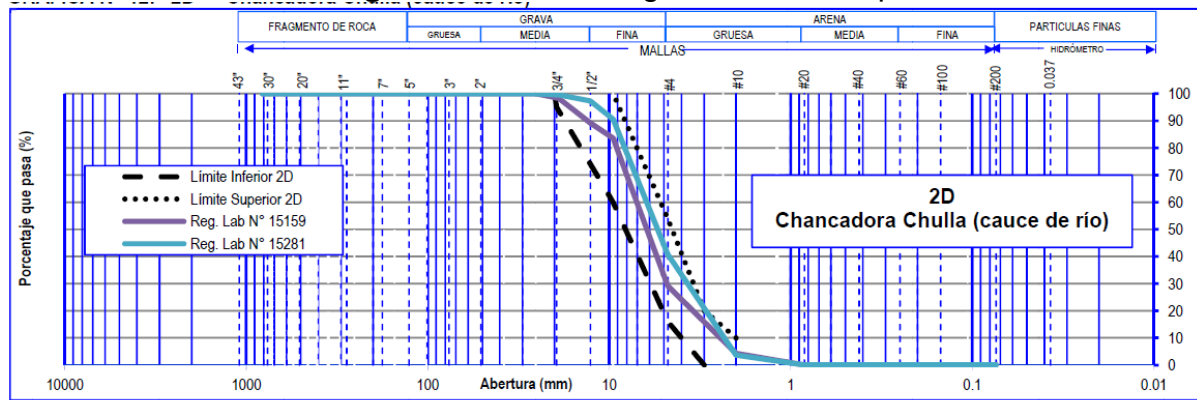
**Imagen N° 2.12: curva granulométrica tipo 3B**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JULIO - "3B" CANTERA JAUPAR Km 0+650													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas (Total)	Densidad Húmeda (kg/m³)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m³)	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
4	2336	4.66	2231	0.2166	5.580X10 <sup>-2</sup>	86.8	11.9	1.3	62.4	20.5	2.8	26.7	2.7

Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT

**Imagen N° 2.13: curva granulométrica tipo 2D**



PROMEDIO DE ENSAYOS REALIZADOS EN EL MES DE JUNIO - 2D CHANCADORA CHULLA (CAUCE DE RIO)													
PEDRAPLEN													
Calas ejecutadas	Densidad Húmeda (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vacíos corregido (adm)	Permeabilidad Matsuo - Akai (cm/s)	Granulometría							
						Grava (%)	Arena (%)	Finos(<200) (%)	D60	D30	D10	Cu	Cc
2	2022	0.80	2006	-	-	-	-	-	6.9	4.3	2.4	2.9	1.1

*Fuente: Informe de calidad ODEBRECHT*

### Características geológicas

El área en estudio se extiende desde las proximidades del puente Rancho al oeste (área de cabecera) hasta el río Chinchavito, unos kilómetros al norte de las confluencia de los ríos Huallaga y Chimao, donde se ubicaría la Casa de Maquinas. Desde puente Rancho a Chinchavito el río Huallaga discurre unos 80 km. con una caída de 1,000 m y una gradiente media de 1.25%. En general el cauce del río es encañonado y torrencioso, discurriendo entre empinadas pendientes de morfología controlada por las estructuras o la Litología. Las mismas características se observan en los tributarios.

Los flancos están constituidos por rocas sin cubierta, a excepción de una zona de terrazas aluviales cerca de puente Rancho e inmediatamente aguas debajo de la confluencia de los ríos Huallaga y Santo Domingo. La diferencia de cotas entre la línea de cumbres y el nivel del río es de 1,500 m, y la pendiente entre ellas empinada, teniendo el talud cubierto de material coluvial.

La inestabilidad potencial de los taludes rocosos existentes desde la desembocadura del río Panao hacia aguas abajo fue el factor más importante para la selección del sitio de presa a unos 300 m agua arriba de la misma confluencia.

La unidad de roca diorítica constituye la cimentación más competente para una



presa de gravedad.

En la región en estudio, la cuenca del río Huallaga, entre Puente Rancho y el lugar de Dos Aguas se orienta de modo tal que recorta las estructuras de la cordillera oriental de rumbo NNO.

El núcleo de estas estructuras de naturaleza anticlinal está constituido por formaciones metamórficas Pre-Cámbricas y sedimentarias del Paleozoico Inferior asociados a intrusiones graníticas; las márgenes están limitadas por fallas regionales, los forman secuencias sedimentarias del Paleozoico Superior y del Mesozoico. Más al Este se encuentran formaciones Cenozoicas que conforman la cordillera Subandina.

El área del Proyecto está compuesta, en el Sector Occidental, por esquistos y gneis, formando pliegues sucesivos, el Sector Central por volcánicos instruidos por un complejo diorítico/tonalítico y el

Sector Oriental por una secuencia de sedimentos detríticos y calcáreos.

Los últimos sectores forman parte del conjunto de pliegues anticlinal/sinclinal al SE y monoclinal dentro de la región del Proyecto. Las estructuras de falla localizadas fuera del proyecto, tanto al este como la sur del mismo, se relacionan a fuerzas de compresión lateral de rumbo NNE. Se trata de fallas inversas y normales de rumbo NNE y buzamientos al Este y Oeste y fallas verticales de rumbo ONO y NNE.

### **Propiedades de la roca calizas**

Tal como se ha planteado en el proyecto de Tesis, las geológica local del proyecto se localiza básicamente en el proyecto CENTRAL HIDROELECTRICA CHAGLLA y obras aledañas a las riberas del río Huallaga en la provincias de Chinchao y Chaglla, como la construcción de la trocha Chaglla Codo de Pozuzo y la ejecución de plantas de tratamiento de aguas residuales de las localidades de Muña y Rinconada donde la geomorfología del macizo rococó es igual.

### **Geomorfología**

Las calizas son rocas sedimentarias de origen fundamentalmente químico u organógeno, formadas al menos por un 50% de carbonato cálcico. Las de origen bioquímico se forman por la acción de los seres vivos. Estos fijan el calcio disueltos



en el agua y lo utilizan para construir sus esqueletos en forma de calcita o aragonito, cuando estos mueren, sus esqueletos darán unas calizas formadas por calcita, siempre el aragonito es inestable y se transforma en calcita, también se depositan calizas en los fondos marinos como consecuencia indirecta del metabolismo de los seres vivos. Así las algas al realizar la fotosíntesis consumen bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); este consumo de bióxido de carbono varía las características del medio con la consiguiente precipitación del carbonato cálcico. La caliza tiene gran interés económico ya que constituye la materia prima del cemento; se utiliza parte en la construcción y como fundente en la industria siderúrgica. Las rocas calizas a pesar de que frecuentemente están recristalizadas o han sufrido reemplazo en grado variable, son designadas con nombres basados siempre en las texturas tanto de superficie fresca como en superficies ligeramente atacadas por intemperismo.

### **Geología regional.**

Se han formado por la desintegración de rocas preexistentes, cuyos detritos fueron transportados, acumulados y compactados en extensas cuencas marinas durante muy largos períodos de tiempo. También por la descomposición y acumulación de vegetales y vida animal o por la precipitación química y decantación de soluciones minerales. La enorme presión soportada por su propio engrosamiento las ha consolidado en formas invariablemente estratificadas o bandeadas (litificación o diagénesis), estratos o mantos que posteriormente han sido intensamente plegados y fallados por eventos tectónicos. Por tanto, aparte de los planos de separación entre capas, muestran complejos sistemas de fisuras de tensión (diaclasas), que indudablemente también influyen en la mecánica de voladura.





### Resistencia dinámica a la compresión.

Define la fuerza o carga por unidad de superficie bajo la cual una roca fallará por corte o cizalla. En otros términos, es la resistencia a ser sobrepasada para llegar a la rotura por presión.

**Tabla N° 2.0** Características de las rocas.

"Resistencia Tensiva de la Roca" (Kg/cm <sup>2</sup> )			
Resistencia de Compresión DE LA ROCA			Densidad
ROCA	RC (Mpa)	RC (Kg/cm <sup>2</sup> )	(Tn/m <sup>3</sup> )
Diorita	235.000	2396.33	2.75
Gabro	305.000	3110.13	3.03
Granito	275.000	2804.22	2.70
Andesita	350.000	3569.01	2.70
Basalto	325.000	3314.08	2.80
Riolita	120.000	1223.66	2.70
Traquita	330.000	3365.06	2.70
Conglomerado	140.000	1427.60	2.60
Arenisca	207.500	2115.91	2.50
Pizarra de grano fino	70.000	713.80	2.70
<b>Caliza</b>	<b>120.000</b>	<b>1223.66</b>	<b>2.60</b>
Dolomita	150.000	1529.57	2.70
Neis	220.000	2243.38	2.70
Cuarcita	190.000	1937.46	2.70
Esquisto	230.000	2345.35	2.70
Pizarra	150.000	1529.57	2.70
Grawaca	220.650	2250.00	2.50
Diabasa	186.330	1900.04	2.96
silicificado	100.000	1019.72	2.60
argilico avanzado	60.000	611.83	2.80
Porfido	201.040	2050.04	2.65
Sienita	171.620	1750.04	2.80

Fuente: (seminario "perforación y voladura de rocas, voladura de construcción, control de vibraciones y prevención de accidentes en obras civiles 2010" Ing. Rómulo Mucho)

### Resistencia dinámica a la tracción.

La resistencia a la tracción de las rocas es considerablemente baja en comparación a la compresión, siendo aproximadamente el 10% de su resistencia a compresión.

Es la facultad de resistir a ser tensada hasta llegar al punto de rotura. También se define como resistencia al arranque.



### Frecuencia sísmica

Es la velocidad que tiene la roca de propagar vibraciones generadas por la detonación de los explosivos confinados en taladros.

Se toma en cuenta cuando existen obras de infraestructura aledañas a la voladura ya que estas pueden afectar a las estructuras.

**Tabla N° 2.1** Frecuencia sísmica de las rocas más comunes

CLASE DE FORMACION	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA LONGITUDINAL ( m/s)
CAPA METEORIZADA	300 – 900
ALUVINES MODERNOS	350 – 1500
ARCILLAS	1000 – 2000
MARGAS	1400 – 4500
CONGLOMERADOS	2500 – 5000
CALIZAS	4000 – 6000
DOLOMITAS	5000 – 6000
SAL	4500 – 6500
YESO	3000 – 44000
ANHIDRITA	3000 – 6000
GNEIS	3100 – 5400
CUSRCITAS	5100 – 6100
GRANITOS	4000 – 6000
GABROS	6700 – 7300
DUNITAS	7900 – 8400
DIABASAS	5800 – 7100

*Fuente: Diseño de voladuras a cielo abierto Ing. Cesar Ayabaca*

### Angulo de fricción interna.

Es la resistencia interior para cambiar inmediatamente de forma cuando se somete a la roca a deformación por presión. También se define como conductividad o pase de las ondas (de compresión o sísmicas) fenómeno que genera calor interno.





Tabla N° 2.2 Angulo de fricción interna de rocas sedimentarias

TIPO DE ROCA	ESTADO DE HUMEDAD	ÁNGULO DE FRICCIÓN BÁSICO $\phi_b$	REFERENCIA
ROCAS SEDIMENTARIAS:			
- Arenisca	Seco	26 – 35	Patton, 1966
- Arenisca	Húmedo	25 – 33	Patton, 1966
- Arenisca	Húmedo	29	Ripley & Lee, 1962
- Arenisca	Seco	31 – 33	Krsmanovic ,1967
- Arenisca	Seco	32 – 34	Coulson, 1962
- Arenisca	Húmedo	31 – 34	Coulson, 1962
- Arenisca	Húmedo	33	Richards, 1975
- Pizarra	Húmedo	27	Ripley & Lee, 1962
- Limolita	Húmedo	31	Ripley & Lee, 1962
- Limolita	Seco	31 – 33	Coulson, 1962
- Limolita	Húmedo	27 – 31	Coulson, 1962
- Conglomerado	Seco	35	Krsmanovic ,1967
- Creta	Húmedo	30	Hurchinson, 1972
- Caliza	Seco	31 – 37	Coulson, 1962
- Caliza	Húmedo	27 - 35	Coulson, 1962

Fuente: Curso Diseño de voladuras a cielo abierto Ing. Cesar Ayabaca

### Planos de estratificación.

Las rocas calizas de la zona estudiada por ser una roca de tipo sedimentaria presentan planos de estratificación que varía en diversas zonas tanto en espesor como en orientación.

Estos afectan a la orientación de la perforación, así como a la voladura ya que estas varían de acuerdo a la consistencia y dureza que existe en las línea del plano

Imagen N° 2.14: Estratificación de la caliza de la cantera 19



Fuente: Imagen propia



**Imagen N° 2.15:** Estratificación de la caliza del ACP 18



*Fuente: Imagen propia*

**Imagen N° 2.16:** Estratificación de la caliza del ACP 18 y SHAF



*Fuente: Imagen propia*

### **Fallas.**

Se presentan también la presencia de algunas fallas, que presenta en la zona de línea de falla la presencia de material fino.

### **Diaclasas**

Se presentan diaclasas entre las estratificaciones de dimensiones variables que afectan directamente a la granulometría de la roca disparada.



**Imagen N° 2.17:** diaclasas en los estratos Cantera 19



Fuente: Imagen propia

**Imagen N° 2.18:** diaclasas en los estratos Jaupar



Fuente: Imagen propia

## PERFORACION DE ROCAS

La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos o blast holes.

Se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpe y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la broca y hasta una profundidad dada por la longitud del barreno utilizado. La eficiencia en perforación consiste en lograr la máxima penetración al

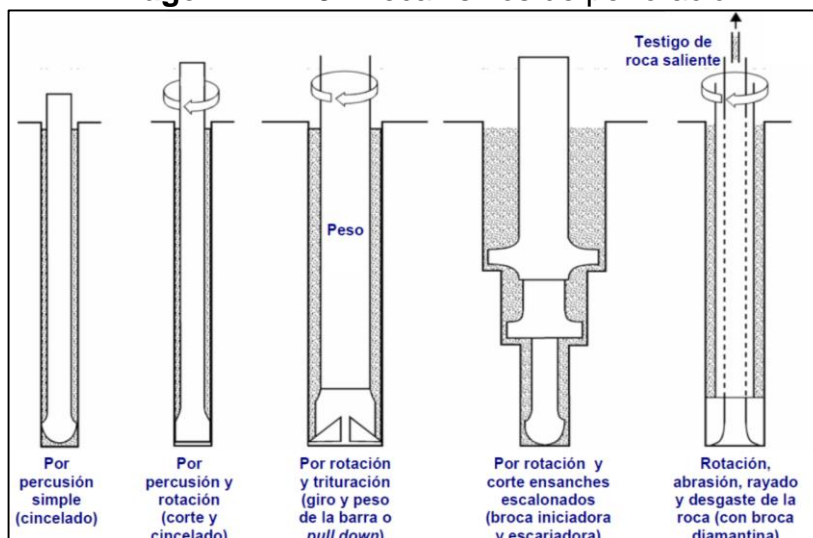
menor costo.

En perforación tienen gran importancia la resistencia al corte o dureza de la roca (que influye en la facilidad y velocidad de penetración) y la abrasividad. Esta última influye en el desgaste de la broca y por ende en el diámetro final de los taladros cuando ésta se adelgaza (brocas chupadas).

La perforación se efectúa por los siguientes medios:

- Percusión, con efecto de golpe y corte como el de un cincel y martillo. Ejemplo, el proporcionado por los martillos neumáticos pequeños y rompe pavimentos.
- Percusión/rotación, con efecto de golpe, corte y giro, como el producido por las perforadoras neumáticas comunes, track drills, jumbos hidráulicos.
- Rotación con efecto de corte por fricción y rayado con material muy duro (desgaste de la roca, sin golpe), como el producido por las perforadoras diamantinas para exploración.
- Fusión (jet piercing) mediante un dardo de llama que funde roca y mineral extremadamente duro como la taconita (hierro), método aplicado en algunos yacimientos de hierro de Norteamérica.

Imagen N° 2.19: Mecanismos de perforación



Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas (EXA)





## EQUIPOS DE PERFORACIÓN

Actualmente se emplean tres tipos de máquinas perforadoras:

### MANUALES

De percusión con aire comprimido, para huecos pequeños (25 a 50 mm de diámetro), para trabajo horizontal o al piso (pick hammer) o para huecos verticales al techo (stoppers). Emplean barrenos de acero integrales terminados en una broca fija tipo bisel, o barrenos con broca acoplable.

Estos equipos generalmente se usan para perforaciones y voladuras secundarias o para perfilar taludes y colocación de pernos de anclaje en donde la perforación con equipo es de difícil acceso.

### MECANIZADAS

De percusión y de rotopercusión, montadas en chasis sobre ruedas u orugas. Para huecos hasta 150 mm (6" de diámetro) y 20 m de profundidad. Ejemplo los wagondrill, track drill y jumbos neumáticos o hidráulicos, que emplean barrenos acoplables con brocas intercambiables.

La diferencia en campo del track drill y rock drill es que la primera es que accede a terrenos accidentados y pendientes bien pronunciadas con más facilidad de la rock drill que es más lento pero de perforación rápida en terreno plano.

**Imagen N° 2.20:** Track Drill perforando taladros de producción



Fuente: Imagen propia



Imagen N° 2.21: Rock Drill DX 680



Fuente: Imagen propia

Imagen N° 2.22: Rock Drill DX 680, perforación secundaria.



Fuente: Imagen propia

## MECANIZADAS ROTATORIAS

Generalmente de grandes dimensiones para uso en tajos abiertos, montadas sobre camión o sobre orugas con traslación propia, con motor rotatorio independiente y brocas rotatorias tricónicas de 6" a 15" de diámetro, siendo las más comunes de 6", 9 7/8", 11 1/4" y 12 5/8".

Un equipo normal de perforación está compuesto por:

- Perforadora o martillo.
- Soporte y carro portador.
- Compresora y bombas hidráulicas.



- Brocas y barrenos.
- Accesorios (mangueras, aceitadoras, etc.)
- 

## MARTILLOS

Son las máquinas que accionan la barra o barreno de perforación y pueden ser:

- Neumáticos, accionados por aire comprimido o hidráulico, accionados por aceite a alta presión.
- Manuales o portátiles, para taladros de 1 a 3 m de profundidad, o de gran capacidad, para huecos de hasta 30 metros.

Los martillos pueden estar ubicados sobre el barreno denominándose drifters, o en la punta del barreno denominándose down the hole, en cuyo caso penetran en la roca junto con el barreno o barra.

**Imagen N° 2.23:** Martillo neumático RH.



*Fuente: Imagen propia*

## LOS SOPORTES

También llamados castillos, pueden ser simples trípodes o patas tubulares de avance automático como las de los stoper y jack hammer. En los jumbos, trackdriles y demás carros perforadores se utilizan brazos articulados y pantógrafos.

Estos últimos muy adecuados para perforación paralela en taladros de arranque por corte quemado. Las rotatorias tienen altas estructuras metálicas (castillos) para soportar el peso de la máquina y de la barra.



## LAS COMPRESORAS

Pueden ser estacionarias, portátiles (móviles) y carrozadas, estas últimas montadas en el mismo carro perforador. Su accionamiento puede ser eléctrico o con motor a explosión (mayormente diesel). De acuerdo al sistema mecánico de compresión pueden ser:

- De pistones (simple y reciprocante), cuando el aire se comprime primero a baja presión y luego a alta en dos cilindros en tandem.
- Rotatorias (de paletas corredizas o vanes, y de tornillo o helicoidales).

**Imagen N° 2.24:** Compresora Atlas Copco.



*Fuente: Imagen propia*

## BROCAS Y BARRENOS

Las brocas son las herramientas cortantes, generalmente de acero altamente resistente al impacto, reforzadas en sus filos con insertos o botones de material muy duro resistente a la abrasión (carburo de tungsteno).

Barras o barrenos son varillas o tubos de acero acoplables que transmiten el impacto del martillo a la broca, ubicada en uno de sus extremos.

Las barras pueden ser tubulares, hexagonales, rígidas, etc. Y sus acoplamientos de rosca, rosca corrida, sogá, cono roscado, cono de embone liso, etc.

Cuando la rosca forma parte del barreno se denomina “integral”, pero por lo general





son independientes o intercambiables ya que su desgaste es mayor que el de la barra. Según la forma de su cara cortante y de la disposición o distribución de los insertos pueden ser del tipo bisel, cruz, equis, botones, expansoras o rimadoras, etc.

En síntesis, las brocas se clasifican en tres grupos:

- De corte Generalmente empleadas en perforación de producción con máquinas chicas, entre 1" y 4" de diámetro, (integrales, cruz, etc.) donde el inserto es el elemento que trabaja y se gasta.
- Rotatorias También llamadas "tricónicas" por estar formadas por tres conos dentados acoplados a un cuerpo fijo o carcasa. Estos conos giran libremente alrededor del eje de la broca cuando ésta entra en movimiento triturando a la roca.
- Diamantinas Empleadas en prospección geológica y en voladura con taladros largos (long holes), generalmente huecas para permitir la extracción de una varilla de la roca o mineral que va siendo perforado (testigo), tienen insertos muy finos de diamante embebidos en una masa o matriz fundida, dura, que conforme se gasta deja aparecer nuevos diamantes.

## SELECCIÓN DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN

Existen diversos tipos y marcas de equipos de perforación para diferentes condiciones de trabajo. Su selección se basa en criterios económicos. De diseño mecánico, mantenimiento y servicio, capacidad operativa, adaptabilidad a los demás equipos de la mina, y de condiciones generales del lugar de trabajo (acceso, roca, topografía, fuentes de energía, etc.).

Uno de los criterios más importantes en perforación es la velocidad de penetración. La introducción de la perforación hidráulica que usa aceite a presión en lugar de aire comprimido para activar el martillo y el resto del equipo de perforación ha logrado aumentar esta velocidad y, por lo tanto, la eficiencia de la perforación,



especialmente en rocas duras.

La penetración neumática ha llegado al tope de su desarrollo por la limitada presión de aire comprimido. Con el sistema hidráulico se pueden aplicar presiones de trabajo muchos mayores sobre la broca. Otra ventaja es que una perforadora hidráulica requiere una tercera parte de la energía que consume una perforadora neumática.

La selección de los equipos depende también del costo y topografía del terreno, ya que los equipos de gran escala no pueden usarse en topografías accidentadas sin embargo estas minimizan el costo de la voladura ya que realizan taladros de diámetro superior que los equipos pequeños, sin embargo la maniobrabilidad de los equipos medianos como el track drill y rock drill hacen que para la topografía del proyecto Chaglla, hacen de estos equipos una alternativa única por su gran movilidad y alcance.

## **DESCRIPCIÓN DE PERFORADORAS PWH-5000**

Este equipo de perforación va montado sobre orugas. La perforación se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpe y fricción trituran la roca, los diámetros del taladro son de 2.5" (64mm) a 4" (100 mm), los mismos que emplean barras MF con brocas intercambiables. La fuente de energía de este equipo es el aire comprimido cuyo ingreso es a través de una línea de 2", con una presión mínima de 6 bares y un caudal de 860 CFM.

## **CARACTERISTICAS**

- ✓ Es una máquina que perfora de 2" a 4" de diámetro y hasta 10 barras acoplables cuando trabaja con una columna T38.



- ✓ Es una máquina que puede trabajar en lugares de difícil acceso siempre y cuando pueda trabajar sobre una plataforma estable.

## APLICACIONES

- ✓ Explotación de canteras, banqueros de producción.
- ✓ Construcción de accesos y carreteras.
- ✓ Taladros para sostenimiento y drenaje.
- ✓ Perforación secundaria de bolonería, corrección de pisos y taludes

## ESPECIFICACIONES TECNICAS DE COMPRESORA ATLAS COPCO XAS187

Es el equipo que proporciona el aire comprimido que es el fluido que se viene utilizando como fuente de energía en la perforación de rocas en el accionamiento de los equipos neumáticos como son los martillos neumáticos y track drill con martillo en cabeza y martillo de fondo. En cualquier proyecto, tanto a cielo abierto como subterráneo, es preciso disponer de compresores, las características básicas de un compresor además del tipo son:

- ✓ El caudal del aire suministrado
- ✓ La presión de salida del aire

**Tabla N° 2.3** especificaciones técnicas compresora Atlas

FOLHA DE DADOS – XAS 187 Pd	
<b>Condições de Referência</b>	
Pressão de admissão absoluta (bar) .....	1,0
Umidade relativa do ar (%) .....	0
Temperatura de admissão do ar (°C) .....	20
Pressão de trabalho efetiva (bar) .....	7
<b>Limitações 1)</b>	
Min. pressão efetiva no reservatório (bar) .....	4,0
Máx. temperatura ambiente (°C) .....	45
Máx. altitude de operação (m) .....	3000
Máx. pressão efetiva no reservatório (bar) .....	8,6
<b>Dados de Performance 1)</b>	
Rotação do eixo, normal e máx. (rpm) .....	2300
Rotação do eixo em alívio (rpm) .....	1550
Descarga livre efetiva (pcm) .....	394
Máx. conteúdo de óleo no ar comprimido (ppm) .....	15
Temperatura do ar comprimido na válvula de saída (°C) .....	amb + 63
<b>Motor</b>	
Motor Diesel .....	Perkins
Modelo .....	1104 A-44T
Cilindros .....	4
Potencia (CV) .....	110
Capacidade de óleo no motor (l) .....	7
Resfriamento (tipo) .....	água
Aspiração .....	Turbinado
<b>Unidade</b>	
Capacidade do sistema de óleo do compressor (l) .....	25
Capacidade do tanque de combustível (l) .....	175
Pressão sonora a 7m, em acordo com a ISO 2151 dB(A) .....	76
<b>Dimensões gerais (aprox.):</b>	
Comprimento (mm) .....	4074
Largura (mm) .....	1789
Altura (mm) .....	1817
Peso (Net) (aprox.) (kg) .....	1523
1) Nas condições de referência e rotação normal do eixo, salvo outra indicação.	
2) Ar requerido para resfriamento do motor e compressor, combustão e compressão.	



## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TRACK DRILL PWH-5000

Tabla N° 2.4 especificaciones técnicas track drill

### 2. Datos Técnicos:

Pressão de trabalho	7 bar
Compressor necessário	750 pcm
Peso incluindo a perfuratriz	4.550 Kgs
Comprimento (sem boom e lança)	3.645 mm
Comprimento (boom a 45° com lança na vertical e perfuratriz PWHP-131LS)	4.255 mm
Comprimento (boom a 45° sem lança e com suporte na vertical)	3.759 mm
Comprimento (boom e lança na horizontal, extendidos para haste de até 3,70 m)	7.518 mm
Comprimento somente da Carreta	2.438 mm
Largura da sapata	254 mm
Curso da perfuratriz na lança (haste de até 3,70 m)	4.356 mm
Altura mínima (boom abaixo de sua fixação incluindo perfuratriz)	125 mm
Altura com lança na vertical	5.753 mm
Altura (boom a 45° com lança na horizontal)	4.250 mm
Altura do solo	203 mm
Altura do gancho de reboque	552 mm
Movimento máximo horizontal do boom à direita	40°
Movimento máximo horizontal do boom à esquerda	40°
Movimento máximo vertical do boom acima	45°
Movimento máximo vertical do boom abaixo	15°
Movimento máximo da lança na vertical	180°
Movimento máximo horizontal da lança a direita	35°
Movimento máximo horizontal da lança a esquerda	50°
<b>Sistema de Tração das Esteiras</b> Motor pneumático 5 cilindros Potência: 11,4 HP	
<b>Sistema de Avanço</b> Motor pneumático 6 cilindros Potência 4,5 HP	

Nota: Medidas tomadas da sapata - máquinas sobre superfície plana.

Fuente: Area de Equipos ODEBRECHT

## PERFORADORA DX-680

Sandvik DX680 es una perforadora hidráulica automatizada cuya fuerza y resistencia supera al track drill común, teniendo la ventaja en velocidad, precisión y comodidad del operador ya que cuenta con una cabina de mando.

La desventaja con el track drill es que no puede acceder a terrenos muy accidentados como la perforadora PWH-500 que por su tamaño es muy versátil en terrenos accidentados y de gran pendiente.



Imagen N° 2.25: Rock Drill



Fuente: Imagen propia

Tabla N° 2.5 Especificaciones técnicas Rock Drill

Hole Diameter:	64 - 102 mm (2 1/2" - 4")
Rock Tools:	38, 45 or 51 mm (1 1/2", 1 3/4" or 2" )
Rock Drill:	17,5 kW
Engine Output:	151 kW
Flushing Air:	6,2 m <sup>3</sup> /min, up to 10 bar
Production Capacity:	2 200 m <sup>3</sup> /8h
Total Weight	14 500 kg

**HYDRAULIC ROCK DRILL**

Rock drill type	HL 650
Drill rod diameters	38, 45, 51 mm
Operating pressure	100-170 bar
Percussion rate	55 Hz
Percussion output power	17,5 kW
Maximum rotation torque	1 325 Nm
Shank lubrication	Air / oil mist
Flushing	Air
Weight	245 kg

**FEED**

Feed type	CF 145H, chain
Length of feed	7 700 mm
Rock drill travel	5 020 mm*
Max. length of starter rod	5 485 mm (18')*
Feed/pull out force	20 kN
Travelling hose reel	Optional
Front jaws	Centralizing Pito 12H
Feed extension travel	1 350 mm
Feed swing	-56°/+52° (-20°/+94°)
Feed tilt	125°
Weight without steels	1 200 kg

Fuente: Area de Equipos ODEBRECHT



## CONDICIONES DE PERFORACIÓN

Para conseguir una voladura eficiente la perforación es tan importante como la selección del explosivo, por lo que este trabajo debe efectuarse con buen criterio y cuidado. Lamentablemente, la supervisión de la correcta operación de perforación aún no es adecuadamente realizada en muchas minas, lo que permite que ocurran deficiencias en la calidad del trabajo (taladros desviados, más espaciados, de longitud irregular, etc.) que determinan pérdidas de eficiencia de la energía explosiva disponible.

Normalmente la calidad de los taladros a ser perforados está determinada por cuatro condiciones: diámetro, longitud, rectitud y estabilidad.

### DIÁMETRO

Depende del tipo de aplicación en que el taladro será utilizado. Como regla general, el de “menor diámetro factible” será el más adecuado y económico de realizar.

### LONGITUD

Influye mucho en la elección de la capacidad del equipo perforador y naturalmente en el avance del disparo (profundidad del taladro).

### RECTITUD

Varía con el tipo de roca, método de perforación y características del equipo perforador. Deben tener la mayor rectitud y alineamiento para que el explosivo sea apropiadamente distribuido.

En la mayoría de trazos de perforación el paralelismo entre taladros es de vital importancia para la interacción de las cargas explosivas en toda la voladura

### ESTABILIDAD

Los taladros deben mantenerse abiertos hasta el momento de su empleo. En terrenos sueltos tienden a desmoronarse por lo que puede ser necesario revestirlos interiormente con tubos especiales para poderlos cargar (casing) o hacer otro taladro adyacente al obturado.





## **VOLADURAS DE ROCAS**

De acuerdo a los criterios de la mecánica de rotura, la voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

El primero se refiere al tamaño de los fragmentos producidos, a su distribución y porcentajes por tamaños, mientras que el segundo se refiere al movimiento de la masa de roca triturada.

Una adecuada fragmentación es importante para facilitar la remoción y transporte del material volado y está en relación directa con el uso al que se destinará este material, lo que calificará a la “mejor” fragmentación.

Así, en la explotación de minerales se busca preferentemente fragmentación menuda, que facilita los procesos posteriores de conminación en las plantas metalúrgicas, mientras que en la de rocas algunas veces se requiere que sea en grandes bloques, como los que se emplean para la construcción de ataguías o rompeolas.

El desplazamiento y la forma de acumulación del material volado se proyecta de la manera más conveniente para el paleo o acarreo, de acuerdo al tipo y dimensiones de las palas y vehículos disponibles.

## **VOLADURA CONTROLADA Y AMORTIGUADA**

El objetivo de la voladura controlada es evitar el rompimiento de la roca fuera de límites previamente establecidos, es decir evitar la sobrerotura (overbreak). Es un método especial que permite obtener superficies de corte lisas y bien definidas, al mismo tiempo que evita el agrietamiento excesivo de la roca remanente, con lo que contribuye a mejorar su estabilidad, aspecto muy importante en trabajos subterráneos de orden permanente, para prevención de desplome de techos y otros riesgos, y en superficie para la estabilidad de taludes en cortes de laderas.

Consiste en el empleo de cargas explosivas lineares de baja energía colocadas en taladros muy cercanos entre sí, que se disparan en forma simultánea para crear y controlar la formación de una grieta o plano de rotura continuo, que límite la superficie final de un corte o excavación.



En términos generales, si el disparo para este corte es anterior a la voladura principal, se le denomina “precorte o presplitting”, y si es posterior se le conoce como Recorte, voladura de contorno o voladura suave (Smooth blasting); en el caso de túneles también suele denominarse voladura periférica.

Se emplea a menudo para el acabado superficial de túneles de obras hidráulicas o viales, para reducir el consumo de concreto cuando éstos tienen que ser cementados, y en cámaras subterráneas para mejorar el autosostenimiento de techos y paredes.

También se aplica para excavaciones precisas para cimentación de maquinaria, para piques y chimeneas, para límite final de bancos en minería a tajo abierto y para extraer grandes y bien formados bloques de piedra ornamental en canteras de mármol, caliza marmórea y granito, entre otros.

### **Teoría del método**

Una carga explosiva convencional acoplada, que llena completamente un taladro, al detonar crea una zona adyacente en la que la resistencia dinámica a compresión de la roca es ampliamente superada, triturándola y pulverizándola.

Fuera de esa zona de transición, los esfuerzos de tracción asociados a la onda de compresión generan grietas radiales alrededor de todo el taladro, lo que se denomina fisuramiento radial.

Cuando son dos las cargas que se disparan simultáneamente, esas grietas radiales tienden a propagarse por igual en todas direcciones, hasta que por colisión de las dos ondas de choque en el punto medio entre taladros, se producen esfuerzos de tracción complementarios perpendiculares al plano axial.

Las tracciones generadas en ese plano superan la resistencia dinámica a tracción de la roca, creando un nuevo agrietamiento y favoreciendo la propagación de las grietas radiales en la dirección de corte proyectado, lográndose esto en especial cuando dos taladros son cercanos.

Posteriormente estas grietas se amplían y extienden bajo la acción de cuña de los gases de explosión que se infiltran en ellas.

La propagación preferencial en el plano axial junto con el efecto de apertura por la presión de gases permite obtener un plano de fractura definido. Según esto, el mecanismo de trabajo de una voladura de contorno comprende a dos efectos

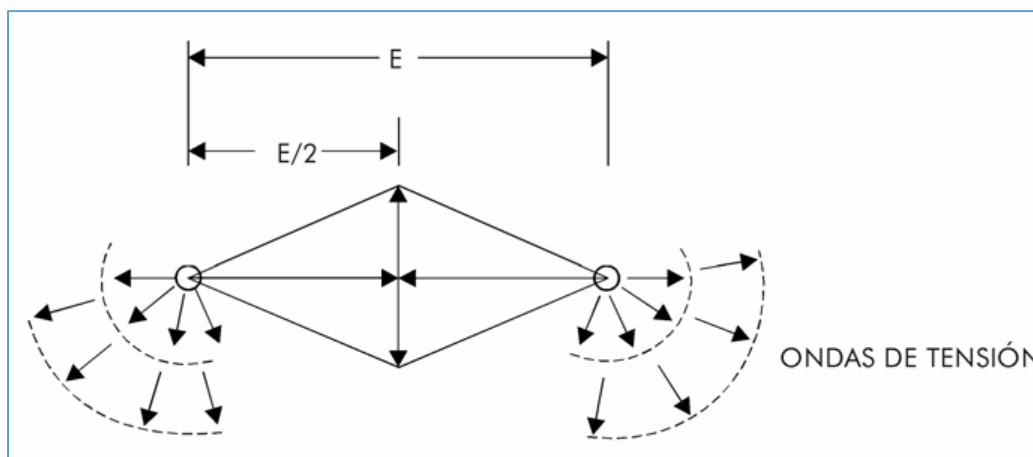
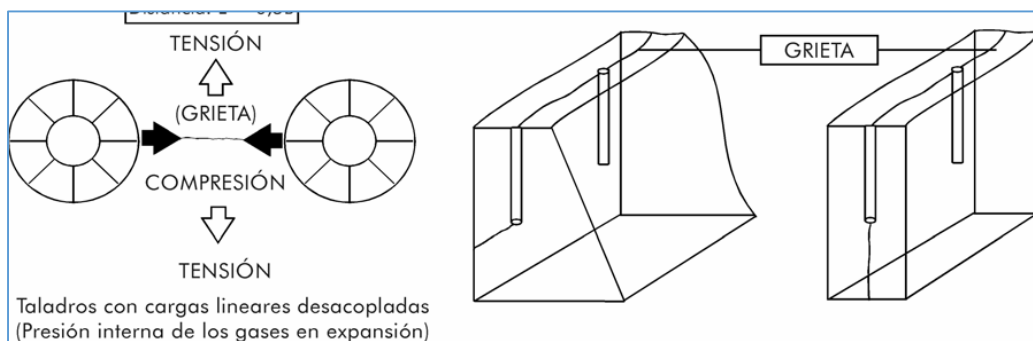


diferentes: uno derivado de la acción de la onda de choque y otro derivado de la acción de los gases en expansión.

La presión de gases es clave en la voladura controlada, por lo que se debe tratar de mantenerla hasta que complete la unión de las grietas que parten de los taladros adyacentes.

Esto se conseguirá adecuando la longitud de retacado para evitar el escape prematuro de los gases a la atmosfera.

**Imagen N° 2.26:** Mecánica de corte lineal en voladura controlada



Tensiones generadas por superposición de ondas de choque producidas por el disparo simultáneo de dos cargas de taladro



Fuente Manual de Voladura Exsa



## EXPLOSIVOS.

En términos generales los explosivos por su forma de reacción se clasifican en: explosivos químicos y explosivos nucleares.

*Los explosivos químicos* actúan por procesos de reacción química de detonación producidos por efecto de una onda de choque. Están mayormente vinculados a compuestos nitrados y son los de aplicación común en minería y construcción civil.

*Los explosivos nucleares* están vinculados a la desintegración de materiales como uranio 235 y plutonio, proceso que desprende inmensas cantidades de energía. Su empleo actual es en el campo militar y de investigación.

Aunque no se clasifican como explosivos, algunos productos especiales actúan como una explosión física sin detonación previa, producida por la súbita expansión de gases inertes licuados como el CO<sub>2</sub> (cardox) por aplicación de calor. Su empleo está limitado a ambientes con alto nivel de grisú en las minas de carbón, o donde no se puede emplear explosivos convencionales.

### EXPLOSIVOS QUÍMICOS.

Los explosivos químicos se clasifican en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque o velocidad de reacción:

- Explosivos rápidos o altos explosivos: de 2 500 a 7 000 m/s.
- Explosivos lentos o deflagrantes: menos de 2 000 m/s

En los explosivos de alta velocidad, usualmente también llamados “detonantes” la onda de choque es supersónica o de alto régimen y autosostenida (constante) lo que garantiza la detonación completa de toda su masa, con un fuerte efecto de impacto triturador o brisante.

Los deflagrantes comprenden a las pólvoras, compuestos pirotécnicos y compuestos propulsores para artillería y cohetería, casi sin ninguna aplicación en la minería o ingeniería civil por lo que no se tratarán en este manual. Sólo cabe mencionar la pólvora de mina usada artesanalmente y para el núcleo de la mecha de seguridad. Su onda de choque es subsónica (menos de 2 000 m/s) por lo que no llegan al estado de detonación siendo su explosión semejante a una combustión



violenta con muy limitado efecto triturador. También el ANFO deficientemente iniciado sólo llega a deflagrar produciendo un efecto netamente expansivo.

Los detonantes se dividen en primarios y secundarios, según su aplicación. Los primarios, por su alta energía y sensibilidad, se emplean como iniciadores para detonar a los secundarios.

Entre ellos podemos mencionar a los compuestos para detonadores y reforzadores (pentrita, azida de plomo, fulminatos, etc.). Los secundarios son los que efectúan el arranque y rotura de las rocas, son menos sensibles que los primarios pero desarrollan mayor trabajo útil, por lo que también se les denomina como “rompedores”. Comprenden dos grupos: de uso civil (industriales) y explosivos de uso militar.

Los militares son más brisantes, menos sensibles al maltrato, más caros y más estables ya que su vida útil (*shelf life*) pasa de 20 años, pero por su bajo volumen de gases no tienen aplicación práctica en voladura de rocas en minería.

Explosivos industriales rompedores para uso en obras civiles y en minería, se dividen en dos categorías:

### **ALTOS EXPLOSIVOS, SENSIBLES AL FULMINANTE (Nº 8).**

Los altos explosivos sensibles comprenden a:

1. Dinamitas.
2. Explosivos permisibles o de seguridad para minería de carbón.
3. Explosivos hidrogel y emulsión sensibilizados.
4. Explosivos especiales.

### **DINAMITAS.**

Altos explosivos mayormente compuestos por un elemento sensibilizador (nitroglicerina u otro éster estabilizado con nitrocelulosa), combinada con aditivos portadores de oxígeno (nitratos) y combustibles no explosivos (harina de madera) más algunos aditivos para corregir la higroscopicidad de los nitratos, todos en las proporciones adecuadas para mantener un correcto balance de oxígeno. En ellas todos sus componentes trabajan contribuyendo energéticamente en la reacción de detonación.



En las dinamitas modernas también denominadas gelatinas explosivas por su consistencia plástica, de fácil uso y manipulación, el porcentaje de nitroglicerina-nitrocelulosa se estima entre 30 y 35% correspondiendo el resto a los oxidantes y demás aditivos. Con menores porcentajes las dinamitas resultan menos plásticas y menos resistentes al agua, denominándose semigelatinas y pulverulentas.

Aún se fabrica en pequeña escala y para casos especiales la dinamita original de Nobel denominada “guhr dynamite” compuesta solamente de nitroglicerina (nitroglicerina 92% - nitrocelulosa 8%) y un elemento absorbente inerte como la diatomita (kieselguhr) que tiene balance de oxígeno nulo, así también la “straight dynamite” en la que la nitroglicerina se encuentra mezclada con compuestos activos pero no explosivos (dopes); también de muy escaso uso en la época actual.

Las dinamitas con mayor contenido de nitroglicerina y aditivos proporcionan alto poder rompedor y buena resistencia al agua, siendo típicamente “fragmentadoras” o “tritadoras”. En el otro extremo quedan las de menor contenido de nitroglicerina y mayor proporción de nitratos, por lo que tienen menor efecto brisante, pero mayor volumen y expansión de gases mostrando mayor capacidad “empujadora o volteadora”. Normalmente su capacidad de resistencia al agua disminuye proporcionalmente al menor contenido de nitroglicerina.

Las principales ventajas de las dinamitas son:

- Sensibles al fulminante N° 6, 8 y otros iniciadores como el cordón detonante, directamente.
- Potencias elevadas, gran efecto triturador.
- Altas densidades, de 1,05 hasta 1,5 g/cm<sup>3</sup>.
- Elevadas velocidades de detonación, entre 3 500 y 6 000 m/s.
- Gran resistencia al agua y estabilidad química.
- Insustituible en casos de trabajo en condiciones de alta presión hidrostática, en condiciones donde el efecto canal es muy crítico, donde se desea una propagación de taladro a taladro por simpatía, para trabajos en condiciones de temperaturas extremadamente bajas y otras más donde los demás explosivos no garantizan respuesta adecuada o eficiente.
- Larga vida útil en almacenaje adecuado (*shelf life*: más de un año).
- Muy raras fallas por insensibilidad a la iniciación.



- Muy buena capacidad de transmisión de la detonación (simpatía) para carguío espaciado.
- Adaptables a casi toda condición de voladura existente y gran facilidad de carguío aun en taladros de condiciones difíciles como los de sobre cabeza.

#### Desventajas:

- Su sensibilidad a estímulos subsónicos con riesgo de reacción al impacto o calor extremo y otros.
- Cefalea transitoria al inhalar su aroma o vapores (por la acción vaso dilatadora de la nitroglicerina, aunque sin efectos tóxicos).

Su empleo está preferentemente dirigido a pequeños diámetros de taladro, en subterráneo, túneles, minas, canteras y obras viales.

Normalmente se comercializan en cartuchos de papel parafinado, con diámetros desde 22 mm (7/8") hasta 75 mm (3") y longitudes de 180 mm (7"), 200 mm (8") y 340 mm (12"), embalados en cajas de cartón de 25 kg.

Convencionalmente, de acuerdo al contenido de nitroglicerina en proporción a la mezcla inicial no explosiva y a aspectos de aplicación, las dinamitas se clasifican en:

- a) Gelatinas.
- b) Semigelatinas.
- c) Pulverulentas.
- d) Especiales.

#### **Gelatinas**

Gelatina Especial 75 y 75 BN; Gelatina Especial 90 y 90 BN; Gelignita y Gelatina Explosiva (con densidades de 1,3 a 1,5 g/cm<sup>3</sup> y velocidades de 5 000 a 6 500 m/s) de consistencia plástica, elevado poder triturador para rocas duras y gran resistencia al agua para trabajos subacuáticos.



### **Semigelatinas**

**Semexsa 45, Semexsa 60, Semexsa 65 y Semexsa 80** (con densidades de 1,08 a 1,2 g/cm<sup>3</sup> y velocidades de 3 500 a 4 500 m/s), de consistencia granular o pulverulenta, adecuada para rocas semiduras y húmedas.

### **Pulverulentas**

**Exadit 45, Exadit 60 y Exadit 65** con densidades de 1,00 a 1,05 g/cm<sup>3</sup> y velocidades de 3 400 a 3 600 m/s), de consistencia granular fina, adecuada para rocas friables, blandas, en taladros secos.

### **Especiales**

**Exsacorte** para voladura controlada y **Geodit** para sísmica.

Las gelignitas y gelatinas tienen alta capacidad de trituración y resistencia al agua, empleándose en rocas duras y en condiciones difíciles. Las semigelatinas son ampliamente usadas en rocas de condiciones intermedias; las pulverulentas en rocas relativamente suaves y secas; y las especiales en trabajos determinados como el precorte y en exploración para prospección sismográfica de hidrocarburos. La textura de las dinamitas varía según su tipo; las gelatinas son homogéneas, de grano fino, relativamente ligosas al tacto, plásticas y moldeables.

Las semigelatinas y más aún las pulverulentas son menos homogéneas en su granulometría, menos plásticas, incluso al tacto se desgranar, no se adhieren a la mano como las gelatinas. Todas son susceptibles a la humedad ambiental, por lo que en almacenaje se deben mantener en sus bolsas plásticas selladas.

### **EXPLOSIVOS PERMISIBLES O DE SEGURIDAD PARA MINERÍA DE CARBÓN.**

Especialmente preparados para uso de minas de carbón con ambiente inflamable, su principal característica es la baja temperatura de explosión, la que se obtiene con la adición de componentes o aditivos inhibidores de llama, como algunos cloruros.

En los de “seguridad reforzada o de intercambio iónico” se consigue rebajar la temperatura de explosión con ingredientes que al reaccionar en el momento de la detonación forman el inhibidor, con mayor poder refrigerante.



Por el tipo de carbón antracítico predominante en las minas del Perú y por su relativa superficialidad, no se reporta significativa presencia de grisú o de polvos inflamables, como ocurre por ejemplo en Europa, Sudáfrica, India y Norteamérica, donde es forzado y obligatorio el empleo de explosivos permisibles.

## **EXPLOSIVOS HIDROGEL Y EMULSIÓN SENSIBILIZADOS.**

### **Explosivos hidrogel (sensibles al fulminante)**

Los hidrogeles están constituidos por una fase continua, que es una solución acuosa de sales oxidantes saturada a temperatura ambiente y gelificada por gomas hidrosolubles; y por una fase dispersa de partículas sólidas, gotitas líquidas, o ambas. En el caso de un líquido disperso, la composición pertenece simultáneamente al grupo de las emulsiones de tipo “aceite en agua”.

Cuando contienen una materia explosiva disuelta en agua, como el nitrato de monometilamina o mononitrato de etileno glicol, son calificados como “explosivo hidrogel”, sensible al fulminante (como la dinamita pero sin nitroglicerina, nitrocelulosa).

Su tiempo de vida útil (*shelf life*) es menor que el de las dinamitas por su natural tendencia a la separación de fases o del incremento de su densidad por migración de sus burbujas de gas.

Estos explosivos son de texturas finas, glutinosas y muy resistentes al agua. Por lo general se presentan en cartuchos de polietileno de pequeño a mediano diámetro. Se emplean en forma similar que las dinamitas, aunque con algunas dificultades para el carguío en taladros sobre cabeza. En esta línea EXSA producía el **Lurigel 600** y **Lurigel 800** en cartuchos de plástico o de papel parafinado, con diámetros de 25 mm o más. Tienen alta velocidad de detonación (3 600 a 5 200 m/s) y brisance, pero su simpatía es más susceptible a fallas por causas externas que las de las dinamitas.

Una limitación común a todos los hidrogeles es su densidad de cartucho, que no debe ser mayor de 1,25 g/cm<sup>3</sup>; de lo contrario pueden perder su capacidad de detonar, lo que se debe tener en cuenta para no atacar los cartuchos excesivamente para confinarlos en el taladro.





### Emulsiones explosivas (sensibles al fulminante)

Las emulsiones explosivas son de tipo inversado “agua en aceite”, componiéndose de dos fases líquidas, una continua, básicamente constituida por una mezcla de hidrocarburos y otra dispersa, que son microgotas de una solución acuosa de sales oxidantes, con el nitrato de amonio como principal componente.

Es importante en su fabricación la elección del agente tenso activo emulsificador y la dispersión ultra fina de la solución acuosa a temperaturas relativamente altas. Por su naturaleza aerófila se hace necesario emplear microburbujas de aire en micro esferas de vidrio, como regulador de densidad y de la sensibilidad al iniciador (eventualmente perlita o compuestos gasificantes).

Entre las emulsiones sensibles o explosivos emulsión; EXSA fabrica la **Semexsa-E 65** y **Semexsa-E 80** presentada en cartuchos de papel parafinado, de pequeño diámetro (de 22 mm o más) y el **Exagel-E 65** y **Exagel-E 80** presentada en manga plástica especial, de pequeño a mediano diámetro (de 25 mm o más).

El aire contenido en las micro esferas al ser violentamente comprimido (adiabáticamente) por la presión de la onda de choque iniciadora, se inflama, produciendo un efecto denominado de puntos calientes (*hot spots*), que hacen detonar a la emulsión (equivaliendo a la nitroglicerina de las dinamitas).

Sus ventajas son su alta velocidad y potencia, excelente resistencia al agua, menor sensibilidad en manipuleo y el ser inodoras (no producen cefalea).

Son pues ideales para taladros inundados y para roca dura, competente. Sus desventajas son el menor tiempo de vida útil, normalmente seis meses según tipo y su menor capacidad de transmisión en condiciones adversas en el taladro, su sensibilidad al iniciador y su simpatía son más susceptibles a fallas que en las dinamitas especialmente cuando ocurren sobre compresión, efecto canal, detritos en el taladro que aíslan los cartuchos o cuando se inicia la columna con un detonador débil.

Sus densidades están entre 1,13 y 1,19 g/cm<sup>3</sup> y sus velocidades entre 4 800 y 5 200 m/s.



Imagen N° 2.27: Emulsion EXSA



Fuente: Imagen Propia

### EXPLOSIVOS ESPECIALES.

Se involucra en este grupo a los productos fabricados para un empleo particular, o para uso en condiciones ambientales fuera de las normales. Su composición básica puede ser dinamita, hidrogeles, explosivos moleculares como TNT, mezclas de nitrato de amonio y otros, presentados con envolturas o envases adecuados para su función o aplicación.

Como ejemplo se puede mencionar al **Geodit** para prospección sísmica, al **Exsacorte** para voladura controlada, al **Primagel-E** que es un *booster* de emulsión, al **Plastex-E** para voladura secundaria, al **Deminex** para la eliminación de minas antipersonales y a otros o cebos reforzadores de TNT-pentolita colados, conos rompedores, cargas dirigidas y otros, con sus propias especificaciones.

### AGENTES DE VOLADURA, NO SENSIBLES AL DETONADOR N° 8

a) Agentes de voladura acuosos (*water gels*) son:

1. Hidrogeles o *slurries*.
2. Emulsiones.
3. Agentes mixtos (emulsión/ANFO o ANFOs pesados).

b) Agentes de voladura NCN granulares, secos. ANFO y similares.



## AGENTES DE VOLADURA ACUOSOS (*WATER GELS*)

### Hidrogeles o *slurries*

Los hidrogeles exentos de materia explosiva propia en su composición no reaccionan con el fulminante y se califican como “agentes de voladura hidrogel, *slurries* o papillas explosivas”, requiriendo de un cebo reforzado o *primer-booster* para arrancar a su régimen de detonación de velocidad estable; de lo contrario, no arrancan o lo hacen a bajo régimen con velocidades transientes dando bajo rendimiento energético, razón por la que en un principio también se les denominaba explosivos de seguridad. También son conocidos como *wáter gels*.

Sus cualidades principales son: alta velocidad de detonación y alta densidad que les dan enorme poder rompedor y elevada resistencia al agua, por lo que resultan excelentes sustitutos del ANFO, para voladura de rocas tenaces y de taladros inundados, incluso con agua dinámica.

Su aplicación está dirigida mayormente a taladros de mediano a gran diámetro en tajos abiertos, tanto como carga de fondo reforzador para taladros muy confinados y para nivelación de pisos, o como carga completa para taladros con agua.

Normalmente se suministran en fundas o mangas plásticas. Su textura es homogénea, viscosa, relativamente ligosa, lo que les permite contenerse adecuadamente en taladros altamente fisurados, sin pérdidas por filtración, lo que garantiza mantener el factor de carga calculado, y también permite cargarlos al taladro soltándolos sin su funda o manga de polietileno. Su alta densidad desplaza fácilmente al agua presente en los taladros.

Por otro lado su viscosidad es incompatible para carguío mecanizado por bombeo y para la mezcla con ANFO.

EXSA produjo su ampliamente conocida y experimentada línea de **Slurrex 40** y **Slurrex 60** encartuchada en mangas de 65 mm de diámetro o más, cuyas densidades son de 1,15 a 1,30 g/cm<sup>3</sup>, sus velocidades de 4 200 a 5 100 m/s y su presión de detonación de 58 a 82 kbar (ANFO: 45 kbar, tomada como patrón).



## Emulsiones

En forma similar, los agentes de voladura emulsión carecen de un elemento explosivo en su composición (eventualmente se sensibilizan con micro esferas) por lo que también requieren ser detonadas con un cebo reforzador de alta presión de detonación. Su aplicación también está dirigida a taladros de mediano a gran diámetro en tajos abiertos, como carga de fondo de alta densidad o como carga de columna (total o espaciada) en taladros con agua, o perforados en roca muy competente.

A diferencia de los explosivos hidrogeles su viscosidad puede ser graduada desde una emulsión líquida similar a una leche de magnesia hasta una viscosidad semejante a una margarina, lo que permite su carga al taladro, tanto en forma encartuchada como a granel mecanizada, por bombeo directo al fondo del mismo para desplazar al agua.

Una ventaja importante es su facilidad de mezcla con el ANFO para formar ANFO Pesado.

EXSA las presenta encartuchadas en mangas de polietilenopropileno (**Slurrex-E 40**, **Slurrex-E 60** y **Slurrex-E 80**) y a granel, suministradas en camión cisterna para entrega directa en la mina donde se carga mediante camiones mezcladores bombeadores (**Slurrex-EG**), directamente como tal o mezclada con ANFO para formar ANFO Pesado sensibilizado. **Slurrex-MA** es una emulsión oxidante inerte no detonable para efectos de transporte hasta ser sensibilizada en el lugar de aplicación, para formar un agente de voladura ANFO pesado, o como emulsión normal de alto nivel de energía.

## Agentes mixtos (emulsión/ANFO o ANFOs pesados)

Son mezclas de emulsión y ANFO en diferentes proporciones, que permiten:

- 1º. Bajar el costo y potencia de una emulsión pura, para voladura en rocas difíciles, secas o húmedas.
- 2º. Darle resistencia al agua al ANFO, al saturar con emulsión los espacios libres entre los prills o perlas del nitrato.

Estos ANFOs pesados se pueden preparar en diferentes relaciones de acuerdo a los requerimientos de la voladura y la presencia de agua, entre 10% a 90% de



emulsión y la diferencia ANFO, siendo los ratios más difundidos 30 – 70, 50 – 50, 60 – 40 y 80 – 20.

Normalmente las mezclas con menos de 50 % de emulsión no son resistentes al agua pero se incrementa notablemente la potencia del explosivo, y las mayores de 50 % emulsión son progresivamente más resistentes al agua.

Se pueden comercializar encartuchados en mangas de polietileno o al granel, preparándolos in situ en camiones mezcladores-cargadores.

EXSA los proporciona encartuchados en mangas de polietileno-polipropileno con la denominación **Slurrex-AP**, en la relación de mezcla que se requiera, ejemplo: **Slurrex-AP 80** y **Slurrex-AP 60** con densidades de 1,26 y 1,28 g/cm<sup>3</sup> y velocidades de 5 600 a 5 400 m/s.

### **AGENTES DE VOLADURA NCN GRANULARES, SECOS, ANFO Y SIMILARES**

En su generalidad se componen de nitrato de amonio sensibilizado por un agregado orgánico, líquido o sólido generalmente no explosivo. El nitrato debe ser perlado y suficientemente poroso para garantizar la absorción y retención del agregado combustible.

Estos poros actúan como elementos sensibilizadores en su detonación.

Son insensibles al detonador N° 8 y requieren de un cebo energético para arrancar. Su velocidad de detonación es relativamente baja por lo que son poco brisantes, pero la natural lentitud de su reacción les permite generar un buen volumen de gases, por lo que son preferentemente expansores o empujadores.

Su mayor limitación es la nula resistencia al agua. Algunas mezclas de baja densidad, detonan en bajo régimen de velocidad y presión. El ejemplo más típico es el ANFO convencional (94,4% nitrato de amonio - 5,6% fuel oil N° 2) con 2 500 a 3 000 m/s de velocidad y 45 kbar de presión.

En ocasiones se trata de mejorar las performances del ANFO añadiéndole aluminio u otros aditivos, resultando por ejemplo el ANFO-AL, el SANFO y otros, que aun así tienen limitaciones en resistencia al agua.

Su empleo a granel está dirigido mayoritariamente a tajos abiertos, canteras, voladura de cráter y voladura de calambucos, por desplome.

Su empleo en subterráneo está limitado a frentes autorizados, aplicándose con cargadores neumáticos portables. En tajo abierto suele emplearse camiones





cargadores con sistemas de gusanos (*augers*) articulados, que permiten verterlos directamente a los taladros.

EXSA comercializa sus agentes de voladura granulares secos bajo la denominación comercial **Examon-P**, **Examon-V** y **Solanfo**, en sacos de polipropileno con bolsa interior de polietileno, de 25 kg netos. Sus densidades van de 0,80 a 85 g/cm<sup>3</sup> y sus velocidades de detonación de 2 700 a 5 000 m/s (dependiendo las condiciones) y su presión de detonación de 45 a 60 kbar. Contienen aditivos antiestáticos para el carguío neumático.

**Imagen N° 2.28:** Anfo EXSA



Fuente: Imagen propia

Los explosivos de uso industrial empleados en voladura de rocas actúan con base en una reacción físico-química de combustión muy rápida que comprende a tres elementos: oxidante, combustible y sensibilizador.

El oxidante proporciona oxígeno al combustible para arder y generar humo, vapor de agua, cenizas y calor en forma convencional y es el sensibilizador el que en cierta forma actúa como un incentivador para acelerar la reacción al nivel de explosión, incrementando enormemente la temperatura con lo que los humos y gases sobrecalentados tienden a expandirse casi instantáneamente para producir los efectos de trituración y desplazamiento de la roca.

Por tanto, los explosivos contienen estos tres elementos, clasificándose en cuatro grupos según el tipo de ellos, como se indica en el cuadro de la parte inferior.

Es interesante observar que el nitrato de amonio es el oxidante común de los cuatro, en diferentes estados (en gránulos, molido o en solución) combinándose eventualmente con otros nitratos o sales, mientras que el sensibilizador puede ser



un alto explosivo molecular como la nitroglicerina, un polvo metálico, aminas o el aire contenido en los poros de los gránulos de nitrato o en las microesferas de vidrio, que al ser comprimido adiabáticamente por la onda de choque del iniciador se inflama y genera puntos calientes (*hot spots*) que producen la detonación del explosivo.

**Tabla N° 2.6** Componentes de los explosivos.

EXPLOSIVOS COMERCIALES – COMPONENTES PRINCIPALES			
TIPO	OXIDANTES	COMBUSTIBLES	SENSIBILIZADOR
Dinamitas	Sólidos Nitrato de amonio y otras sales	Sólidos Materiales absorbentes, pulpa de madera, celulosa	Líquido Nitroglicerina y otros
ANFO y otros nitrocarbonitratos granulados	Sólidos Nitrato de amonio granulados	Sólido – líquido Petróleo diesel, carbón y otros aceites	Aire Poros vacíos de aire en los prills de nitrato de amonio
Hidrogel (slurry) (dispersión de aceite en agua)	Sólido – líquido Nitrato de amonio y otras sales (soluciones salinas)	Sólido – líquido Petróleo, aluminio, sensibilizantes orgánicos, gomas	Sólido – líquido Nitrato de monometil amina, mononitrato de etileno glicol, aluminio en polvo y otros gasificantes
Emulsiones (dispersión de agua en aceite)	Líquido Soluciones de nitrato de amonio y otras sales	Líquido Petróleo, aceites, emulsificantes, parafinas	Gasificantes Aire contenido en microesferas de vidrio y otros gasificantes

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

Aparte de la composición química, algunos otros factores influyen en ciertos casos en el performance de los explosivos, como el tamaño de las partículas oxidantes, siendo un promedio usual el mostrado en el cuadro siguiente (según Bampffield y Morrey).

**Tabla N° 2.7** Características de los explosivos Exsa.

EXPLOSIVO	TAMAÑO DE PARTÍCULA (mm)	ESTADO	VELOCIDAD DE DETONACIÓN (M/S)
ANFO	2,0	Sólido	3 200
Dinamita	0,2	Sólido	4 000
Hidrogel (slurry)	0,2	Sólido – líquido	3 300
Emulsión	0,001	Líquido	5 000 a 6 000

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

Es también interesante para un criterio de selección, además de la composición y características, tener en cuenta aspectos prácticos como el factor de eficiencia o grado de aprovechamiento de la energía, como se aprecia en el cuadro siguiente:

**Tabla N° 2.8** Porcentaje de energía, Explosivos EXSA

GRADO DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE DIVERSOS EXPLOSIVOS (%)	
Explosivos moleculares (nitroglicerina, pentrita, TNT y otros)	95 a 100
Emulsiones	90 a 95
ANFOs pesados bombeables (sobre 60% emulsión)	75 a 90
ANFOs pesados vaceables (bajo 50% ó 60% emulsión)	65 a 85
Hidrogel	55 a 70
ANFO	60 a 80
SANFO	50 a 70

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa





## ACCESORIOS DE VOLADURA

### MECHA DE SEGURIDAD

La Mecha de Seguridad es uno de los componentes del sistema tradicional de voladura.

Su estructura está compuesta por capas de diferentes materiales; las cuales protegen al núcleo de pólvora. Un recubrimiento final de material plástico asegura una excelente impermeabilidad y buena resistencia a la abrasión.

La alta potencia de su chispa activa la detonación del fulminante, siempre y cuando se cumpla con las recomendaciones de fijar correctamente el fulminante a la mecha de seguridad.

**Tabla N° 2.9** Especificaciones técnicas de mecha de seguridad.

ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications		
CARACTERISTICA <i>Features</i>	UNIDADES <i>Units</i>	ESPECIFICACIONES <i>Specifications</i>
Núcleo de pólvora <i>Powder core</i>	g / m <i>grams/meter</i>	6,00 ± 0,20
Tiempo de combustión a nivel del mar <i>Burning speed at sea level</i>	s / m <i>seconds/meter</i>	160 ± 10
Diámetro externo <i>Outside diameter</i>	mm <i>mm</i>	5,00 ± 0,15
Recubrimiento externo <i>External coating</i>		Plástico <i>Plastic</i>
Resistencia a la impermeabilidad <i>Resistance to water</i>		Buena <i>Good</i>
Resistencia a la abrasión <i>Resistance to abrasion</i>		Buena <i>Good</i>

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

### FULMINANTE SIMPLE N° 8

El Fulminante Simple N° 8 es uno de los componentes del sistema tradicional de voladura.

Está conformado por un casquillo cilíndrico de aluminio cerrado en uno de sus extremos, en cuyo interior lleva una carga primaria de un explosivo sensible a la chispa y otra carga secundaria de alto poder explosivo.

El Fulminante Simple N° 8 tiene todas las garantías para un buen funcionamiento, siempre y cuando, se cumplan con las recomendaciones de un adecuado fijado a la mecha de seguridad, controlando principalmente la impermeabilidad en el lugar donde se encuentra el referido fijado.



Imagen N° 2.29: fulminante n°8



Fuente: Imagen propia

Tabla N° 2.10 Especificaciones técnicas Fulminante n°8

ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications		
CARACTERISTICA Features	UNIDADES Units	ESPECIFICACIONES Specifications
Longitud Length	mm	48,50 ± 0,10
Diámetro externo Outside diameter	mm	6,10 ± 0,10
Diámetro interno Inside diameter	mm	5,40 ± 0,10
Volumen Trauzl Trauzl volume	cm <sup>3</sup>	23,36
Resistencia al impacto Resistance to shock	2 kg en un metro 2 kg x 1 meter	Si cumple Satisfactory
Carga explosiva total Total explosive charge	mg	900
Sensibilidad a la chispa de la mecha de seguridad Sensitivity to the spit generated by the safety fuse		Buena Good

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## CONECTOR DE IGNICIÓN

El Conector de Ignición es uno de los componentes del sistema tradicional de voladura. Está conformado por un casquillo cilíndrico de aluminio cerrado en uno de sus extremos, en cuyo interior lleva una carga pirotécnica sensible a la llama producida por la mecha rápida, además el casquillo tiene una ranura paralela y cercana a la base por donde se inserta la mecha rápida.

El Conector de Ignición tiene incorporado un collar plástico para una eficiente conexión con la mecha rápida, minimizando las dificultades que normalmente existen en otros productos similares que no cuentan con este collar. Por lo expuesto anteriormente, no es necesario presionar para bajar la tapa de la ranura del conector, ni hacer amarres especiales con la mecha rápida para asegurar la conexión de ambos accesorios.

El conector de ignición tiene todas las garantías para un buen funcionamiento, siempre y cuando, se cumplan con las recomendaciones de un adecuado fijado a la mecha de seguridad.

Imagen N° 2.30: Conector de ignición.



Fuente: Imagen propia

Tabla N° 2.11 Especificaciones técnicas Conector de Ignicion

ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications		
CARACTERISTICA <i>Features</i>	UNIDADES <i>Units</i>	ESPECIFICACIONES <i>Specifications</i>
Longitud <i>Length</i>	mm	27,50
Diámetro externo <i>Outside diameter</i>	mm	6,00 - 6,07
Diámetro externo en la base <i>Outside diameter on the base</i>	mm	6,17 - 6,33
Diámetro interno <i>Inside diameter</i>	mm	5,47 - 5,49
Carga de material pirotécnico <i>Pyrotechnical material</i>	mg	500
Collar plástico incorporado <i>Integral plastic collar</i>		Bueno y compatible <i>Good and compatible</i>

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## MECHA RAPIDA

La Mecha Rápida es uno de los componentes del sistema tradicional de voladura. Es un cordón delgado y flexible, que está conformado por una masa pirotécnica inflamable, dos alambres y un forro plástico.

Se quema con llama abierta a mayor velocidad que la mecha de seguridad.

En el momento de efectuar el circuito de conexión la Mecha Rápida se introduce en la ranura de los conectores y se asegura con el respectivo collar plástico incorporado. En estas condiciones la Mecha Rápida está lista para ser activada por medio de la llama de un fósforo u otro agente externo.

El objetivo fundamental de este accesorio es eliminar el chispeo manual de la



mecha de seguridad, evitando la exposición de los operadores a los humos de la combustión. Además permite la salida segura del personal del lugar de disparo.

Para efectuar los empalmes entre dos tramos de Mecha Rápida es necesario tener especial cuidado en cumplir las recomendaciones del fabricante.

**Imagen N° 2.31:** mecha rapida



Fuente: Imagen propia

**Tabla N° 2.12** Especificaciones técnicas mecha de rapida

ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications		
CARACTERISTICA <i>Features</i>	UNIDADES <i>Units</i>	ESPECIFICACIONES <i>Specifications</i>
Peso promedio del material pirotécnico <i>Average weight of the pyrotechnical core</i>	g / m <i>g / m</i>	5,00
Diametro externo promedio <i>Average outside diameter</i>	mm <i>mm</i>	1,90
Peso total promedio <i>Average total weight</i>	g / m <i>g / m</i>	6,50
Tiempo de combustión a nivel del mar <i>Burning rate at sea level</i>	s/m <i>s / m</i>	30 - 45
Cobertura <i>Coating</i>		Plástica <i>Plastic</i>

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## DETONADOR ENSAMBLADO

El Detonador Ensamblado está compuesto por los siguientes accesorios:

- Un fulminante simple N° 8.
- Un tramo de mecha de seguridad.
- Un conector de ignición con su respectivo collar plástico incorporado.

Es usado complementariamente con la mecha rápida con la cual se efectuará el circuito de encendido de una voladura planificada. Las ventajas fundamentales que se consiguen con el uso del detonador ensamblado son:

- Eliminar los problemas que generalmente existen en la preparación de los detonadores ensamblados en mina.



- Evitar el chispeo manual de la mecha de seguridad, reduciendo la exposición de los operadores a los humos de la combustión, permitiendo la salida segura del personal del lugar de disparo.

**Imagen N° 2.32:** Detonador



Fuente: Imagen propia

**Tabla N° 2.13** Especificaciones técnicas detonador

<i>ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications</i>
Las especificaciones técnicas son las mismas que el de sus componentes: <i>See individual component specifications</i>
Mecha de Seguridad <i>Safety fuse</i>
Fulminante Simple N° 8 <i>Standard N° 8 Blasting Cap</i>
Conector de Ignición <i>Igniter cord connector</i>

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## CORDÓN DETONANTE

Es un cordón explosivo resistente y flexible, que contiene un núcleo de alto explosivo (pentrita) que está cubierta con un papel de características especiales, fibras sintéticas e hilos de algodón y un recubrimiento final de plástico.

Se activa generalmente por medio de un fulminante común, eléctrico o no-eléctrico. El núcleo de explosivo detonará a una velocidad de 7 000 m/s aproximadamente, creando una onda de choque que permitirá activar explosivos sensibles a detonador. Es manipulado con gran facilidad y seguridad.





Este accesorio para voladura tiene múltiples aplicaciones en minería, canteras, movimientos de tierra y diferentes trabajos de ingeniería civil. Funciona adecuadamente en todo tipo de voladuras, independiente del diámetro y longitud del taladro.

Imagen N° 2.33: Cordon detonante 5G.



Fuente: Imagen propia

Tabla N° 2.14 Especificaciones técnicas cordón detonante

ESPECIFICACIONES TECNICAS/ <i>Technical specifications</i>	
CARACTERISTICA <i>Features</i>	ESPECIFICACIONES <i>Specifications</i>
Velocidad de detonación VOD-m/s <i>Velocity of detonation</i>	6 650 m/s minima
Carga de Núcleo <i>Core charge</i>	4,40 g/m
Diámetro externo <i>Outside diameter</i>	3,00 mm
Resistencia a la Tracción <i>Tensile strength</i>	50 kgf
Color del Recubrimiento <i>Pyrotechnical material</i>	Naranja <i>Orange</i>
Material de Recubrimiento <i>Covering Material</i>	PVC <i>PVC</i>

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## BOOSTER

El Booster es un accesorio para voladura que en su composición tiene una mezcla de explosivos de alta densidad. Cuando es activado desarrolla una alta velocidad y gran presión de detonación. Estas características permiten que los explosivos iniciados dentro del taladro por intermedio del Booster, desarrollen sus verdaderos niveles de energía, aspecto que permitirá mejorar su rendimiento. Su presentación es de forma cilíndrica con dos o tres orificios paralelos a su eje, uno de ellos tiene un tope para fijar adecuadamente cualquier tipo de detonador (eléctrico, no eléctrico o electrónico).



También puede ser utilizado sin ninguna dificultad con otros tipos de fulminantes o con cordón detonante.

Se usa en voladuras de taladros de diferentes diámetros y longitudes, con la finalidad de activar eficientemente explosivos no sensibles al detonador.

**Tabla N° 2.15** Especificaciones técnicas Booster

ESPECIFICACIONES TECNICAS/Technical specifications		TIPOS DE BOOSTER Types of boosters		
CARACTERISTICAS Features	Unidades Units	1/3 libra 1/3 lb	1 libra 1 lb	2 libras 2 lb
Densidad Density	g /cm <sup>3</sup>	1,62	1,62	1,62
Velocidad de detonación Detonation velocity	m /s	7 000	7 000	7 000
Presión de detonación Detonation pressure	Kbar	202	202	202
Energía Energy	Kcal /kg	2 652	2 652	2 652
Resistencia al agua Water resistance	Horas Hours	72 excelente (excellent)	72 excelente (excellent)	72 excelente (excellent)
Volumen de gases Fumes volume	l /kg	932	932	932
Potencia relativa al ANFO Strength relative to ANFO	En peso By weight	2,66	2,66	2,66
Diámetro Diameter	Pulgadas Inches	1 1 /2	2 1/4	2 1/2
Largo Length	Pulgadas Inches	2 1/4	4 1/2	8 1/4

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

## RETARDO DE SUPERFICIE BIDIRECCIONAL

El Retardo de Superficie es un sistema no eléctrico de retardo bi-direccional, compuesto por dos detonadores ensamblados en conectores plásticos y unidos por un tubo de choque transmisor de señal.

- El Retardo de Superficie puede ser utilizado en minería a cielo abierto, canteras y obras civiles.
- Los fulminantes de Retardo de Superficie poseen carga suficiente para sensibilizar cordones con carga de núcleo de hasta 10 g/m.
- El sistema de conexión del Retardo de Superficie, fácil y resistente, agiliza la aplicación del producto.





**Imagen N° 2.34: Retardo 42 ms.**



Fuente: Imagen propia

**Imagen N° 2.35: Retardo 75 ms.**



Fuente: Imagen propia



**Imagen N° 2.36: Retardo 300 ms.**



*Fuente: Imagen propia*

**Tabla N° 2.16 Características Retardos bidireccionales**

IDENTIFICACION/Identification									
Colores de los conectores <i>Connector color</i>	Verde <i>Green</i>	Amarillo <i>Yellow</i>	Rojo <i>Red</i>	Naranja <i>Orange</i>	Azul <i>Blue</i>	Blanco <i>White</i>	Salmón <i>Salmon</i>	Violeta <i>Violet</i>	Negro <i>Black</i>
Tiempo de retardo (ms) <i>Delay time (ms)</i>	9	17	25	42	75	100	130	200	300

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa

**Tabla N° 2.17 Características explosivos EXSA**

"Presion de Detonacion del Explosivo" (Kg/cm2)			
Agentes de Voladura	g/cm3	Kbar	Kg/cm2
Detonita E	1.15	72.00	73419.55
Detonita EX	1.15	68.00	69340.69
EMULEX 45	1.00	63.00	64242.11
EMULEX 65	1.12	85.00	86675.86
EMULEX 80	1.14	87.00	88715.29
Emulgran 300	1.25	83.00	84636.43
Emulgran 600	1.25	77.00	78518.13
Emulnor 1000	1.15	72.00	73419.55
Emulnor 3000	1.15	68.00	69340.69
Emulnor 5000	1.15	61.00	62202.68
Emulplast 1.0	1.15	72.00	73419.55
Emulplast 5.0	1.15	72.00	73419.55
<b>EXAGEL-E 65</b>	<b>1.14</b>	<b>82.00</b>	<b>83616.71</b>
EXAGEL-E 80	1.12	86.00	87695.58
<b>EXSAMON P</b>	<b>0.84</b>	<b>32.00</b>	<b>32630.91</b>
EXSAMON V	0.85	34.00	34670.34
GELATINA ESPECIAL 75	1.38	125.00	127464.50
GELATINA ESPECIAL 90	1.42	136.00	138681.38
PRIMAGEL-E (Booster)	1.18	91.00	92794.16
SAMEXSA-E 65	1.12	82.00	83616.71
SAMEXSA-E 80	1.18	83.00	84636.43
Superfam - Nitrato de Amonio	0.76	50.00	50985.80

Fuente: Manual Voladura de rocas Exsa



## CAPITULO III

### MARCO METODOLOGICO

#### **Enfoque de la Investigación**

La investigación según la bibliografía revisada corresponde a una cuantitativa.

#### **Alcance de la investigación**

La investigación tiene un alcance descriptivo, ya que lo manifiesta Roberto Hernandez Sampieri (2006)). “Metodología de la Investigación. México MCGRAW-HILL” Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis (Danhke, 1989). Es decir, miden, evalúan o recolectan datos sobre diversos conceptos (variables), aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar. En un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide o recolecta información sobre cada una de ellas, para así (valga la redundancia) describir lo que se investiga.

#### **Diseño de la Investigación.**

Diseño no experimental de Investigación. Diseño transeccional descriptivo ya que según Roberto Hernández Sampieri (2006). “Metodología de la Investigación. México MCGRAW-HILL” la investigación tiene como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiesta una o más variables. El procedimiento consiste en medir en un grupo de personas u objetos una o generalmente más variables y proporcionar su descripción. Son, por lo tanto, estudios puramente descriptivos que cuando establecen hipótesis, éstas son también descriptivas.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

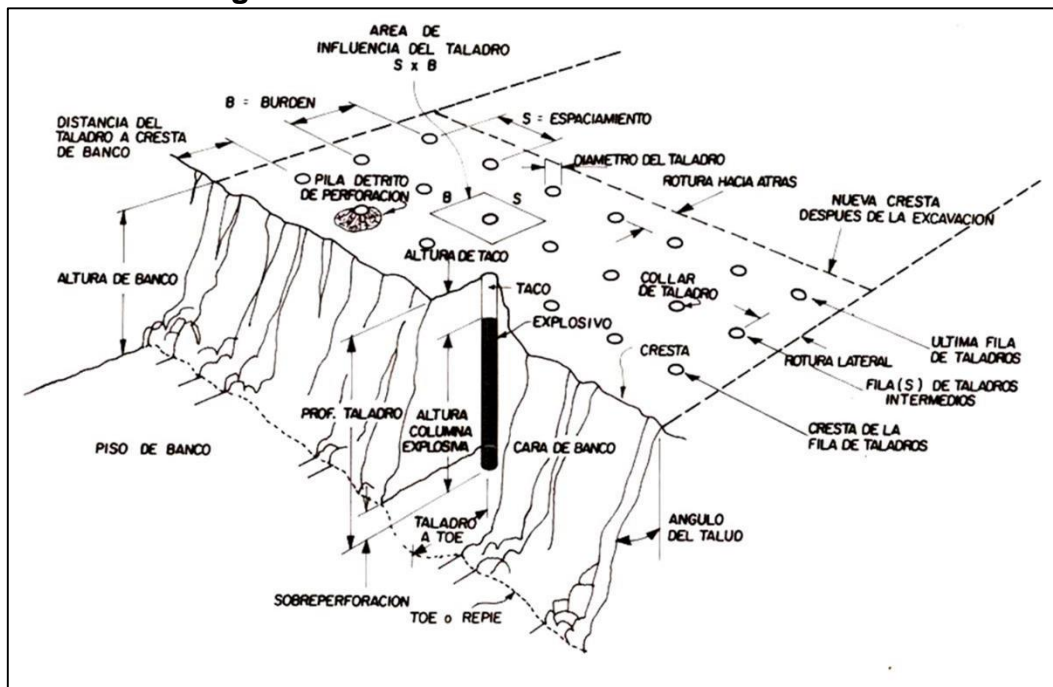
#### Diseño de la Perforación

El diseño de la perforación consiste en determinar los parámetros como, burden, espaciamiento, longitud de taladro, sobre perforación, inclinación de taladro, carga explosiva.

Y existen varios métodos para poder estimar esos parámetros que pueden verse en diversas bibliografías.

A lo largo de los años los modelos y teorías matemáticas han ido evolucionando y hoy en día existen varias ecuaciones que nos permiten estimar los parámetros de perforación de rocas y posteriormente ajustarlos con los resultados obtenidos de acuerdo a las necesidades de obra, por ello el diseño de perforación y voladura se considera una ciencia y un arte.

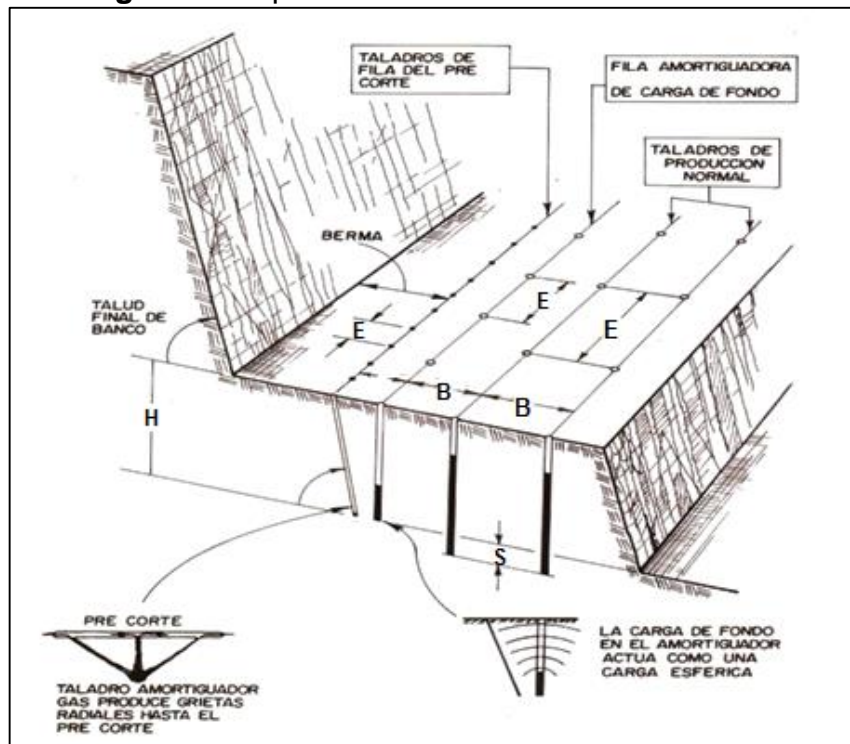
**Imagen 4.0:** Nomenclatura de voladura de bancos



Fuente: Imagen propia



Imagen 4.1: Tipos de taladros en Voladura de banco



Fuente: Imagen propia

En continuación se describe los diferentes modelos matemáticos de aproximación de los parámetros de perforación en donde cada autor aproxima sus parámetros considerando diferentes parámetros de la perforación.

Como se puede apreciar todos los autores consideran el parámetro fundamental la selección del diámetro de perforación con el cual ya se puede estimar los demás parámetros como burden, espaciamento, sobre perforación, así como otros autores como KONYA considera la densidad del explosivo y del macizo rocoso para estimar estos parámetros.

Según muchos autores el parámetro fundamental es el burden o línea de menor resistencia a la cara libre, por ello hay ecuaciones que solo calculan este parámetro.



## MODELO MATEMATICO DE ASH

$$B \text{ (pies)} = (1 / 12) \times K_B \times D$$

Dónde:

B = Burden (pies)

D = Diámetro del taladro ( pulgadas )

K<sub>b</sub> = Constante que depende de la clase de roca y del tipo de explosivo empleado.

**Tabla N° 4.0** Tabla para estimar la Constante K<sub>b</sub>

Tipo de Explosivo	Tipo de Roca		
	Blanda	Media	Dura
Baja densidad (0.8 -0.9) gr/cc Baja potencia	30	25	20
Densidad media (1.0 – 1.2) gr/cc Potencia media	35	30	25
Alta densidad (1.3 – 1.4) gr/cc Alta potencia	40	35	30

Fuente: Pevoex

PROFUNDIDAD DE TALADRO	$L = (K_l \times B)$	K <sub>l</sub> = [1.5-4]
ESPACIAMIENTO	$E = (K_e \times B)$	K <sub>e</sub> : 2.0 Para iniciación simultanea de Taladros K <sub>e</sub> : 1.0 para taladros secuenciados con retardos largos K <sub>e</sub> : [1.2-1.8] para taladros secuenciados con retardos cortos
LONGITUD DEL TACO	$T = (K_t \times B)$	K <sub>t</sub> = [0.7-1]
SOBREPERFORACION	$Sc = (K_s \times B)$	K <sub>s</sub> = [0.2-1]

## MODELO MATEMATICO DE PEARSE

$$B = K \times D \times 10^{-3} \times (Pd / Rt)^{0.5}$$

Donde:

B = Burden o Piedra máxima ( m ).



$K$  = Constante que depende de las características de la Roca ( 0.7 a 1.0 ).

$D$  = Diámetro del barreno ( mm ).

$P_d$  = Presión de detonación del explosivo (Kg / cm<sup>2</sup>).

$R_t$  = Resistencia tensiva de la Roca (kg / cm<sup>2</sup>).

$$K = 1.96 - 0.27 \ln (ERQD)$$

$$ERQD = RQD \times JSF$$

ERQD = Índice de calidad de roca equivalente ( % ).

RQD = Índice de calidad de roca (Rock Quality Designation).

JSF = Joint Strength Correction Factor

**Tabla N° 4.1** Factor de corrección de Pearse

"Factores de Corrección para estimar JSF"	
Estimación de la calidad de la roca	JSF
Fuerte	1
Media	0.9
Débil	0.8
Muy Débil	0.7

Fuente: Pevoex

**Tabla N° 4.2** Índice de calidad de roca

" Índice de la calidad de roca RQD "	
RQD (%)	CALIDAD DE ROCA
100 - 90	MUY BUENA
90 - 75	BUENA
75 - 50	MEDIANA
50 - 25	MALA
25 - 0	MUY MALA

Fuente: Pevoex





## MODELO MATEMATICO DE KONYA

$$B = 3.15 \times d \left( \frac{\rho_e}{\rho_r} \right)^{0.33}$$

Dónde:

- B = Burden (pies)  
d = Diámetro de la carga ( pulg.)  
 $\rho_e$  = Densidad del explosivo (gr/cc).  
 $\rho_r$  = Densidad de la roca (gr/cc).

$$B = \left[ \left( \frac{2\rho_e}{\rho_r} \right) + 1.5 \right] \times d$$

## ESPACIAMIENTO

\* Barrenos de una fila instantáneos

$$H < 4B$$

$$E = (H+2B)/3$$

$$H \geq 4B$$

$$E = 2B$$

\* Barrenos de una fila secuenciados

$$H < 4B$$

$$E = (H+7B)/8$$

$$H \geq 4B$$

$$E = 1.4B$$

## TACO

$$T = 0.7 B$$

SOBREPERFORACION  $J = 0.3B$

## MODELO MATEMATICO DE ANDERSEN

$$B = (\emptyset \times L)^{0.5}$$

DONDE:

- B : Burden (pies)  
 $\emptyset$  : Diámetro del Taladro ( plg)  
Lt : Longitud del taladro (pies)



### MODELO MATEMATICO DE FRAENKEL

$$B = (\emptyset^{0.8} \times L_t^{0.3} \times L_c^{0.3} \times R_v) / 50$$

DONDE:

- Burden
- B : (m)
- Lt : Longitud del Taladro (m)  
Longitud de carga
- Lc : (m)
- ∅ : Diámetro del barreno (mm)
- RV : Resistencia a la voladura Rv: [1-6]  
rocas con alta resistencia a la compresión 1.5  
rocas con baja resistencia a la compresión 5

También se utiliza de manera simplificada:

$0.8 B < 0.67 L_t$
$L_c = 0.756 L_t$ :
$E = 1.5 B$

### MODELO MATEMATICO DE UCAR

$$1.5 B^2 H + 2B \times q_1 - 3H \times q_1 = 0$$

- H : Altura del Banco (m)
  - B : Burden (m)
  - q1 : Factor de carga (Kg/m)
  - Consumo específico de explosivo (0.4 Kg/m<sup>3</sup>)
  - Carga total de explosivo por barreno (Kg)
  - Concentración lineal de carga (Kg/m)
  - Longitud de Carga
  - Espaciamiento
- $$Q_t = 0.4 \times B \times S \times H$$
- $$q_1 = p_e \times (D/36)^2$$
- $$L_c = H - B + B/3$$
- $$B = H$$



## MODELO MATEMATICO DE FOLDESI

$$B = 0.88 \times \varnothing \times (\rho_e / (m \times CE))^{0.5}$$

$\varnothing$  : Diámetro del barreno (mm)

Densidad del explosivo dentro del barreno

$\rho_e$  : (Kg/m<sup>3</sup>)

B : Burden (m)

CE : Consumo específico del explosivo (Kg/m<sup>3</sup>)

VOD: Velocidad de detonación (m/s)

RC: Resistencia a la compresión Mpa

$$m = 1 + 0.63 / (\ln(\rho_e \times VOD^2) - \ln RC - 1.39)$$

En caso de secuencia instantánea se toma:  $2.2 < m < 2.8$

En caso de secuencia con microretardo se toma:  $1.1 < m < 1.4$

Espaciamiento:  $E = m \times B$

Burden:  $B_f = 1.2 \times B$

Taco:  $T = 1.256 \times (B \times VOD / VC) \times (\rho_e / \rho_r)^{0.5}$

VOD : Velocidad de detonación del explosivo (m/s)

VC : Velocidad de propagación de las ondas en la roca  
(m/s)

RC : Resistencia a la compresión de la roca (Mpa)

Sobre perforación:  $J = 0.3 \times B$



## MODELO MATEMATICO DE RUSTAN

Para la coladura en superficie se aplica la siguiente formula:

$$B = 18.1 \times \varnothing^{0.689} \quad (\text{superficial})$$

$\varnothing$  : Diametro de los barrerno entre [ 89 - 311] mm

## MODELO MATEMATICO DE LOPEZ JIMENO

Para nuestro caso solo seleccionamos las tablas establecidas para voladuras de diámetro pequeño, ya que nuestra topografía y geología accidentada permiten el uso de equipos de perforación con barrenos de ese diámetro.

**Tabla N° 4.3** Tabla de diseño López Jimeno

DIAMETRO DEL BARRENO (mm)	Produccion horaria media (m3/hr)	
	Roca blanda - media < 120MPa	Roca dura - muy dura > 120MPa
85	190	60
89	250	110
150	550	270

Altura de Banco H(m)	Diametro del barreno $\varnothing$ (m)	Equipo de Carga Recomendado
8 - 50	65 - 90	Pala de Ruedas
10 - 15	100 - 150	Excavadora hidraulica o de cables



Variable de diseño	Resistencia a la compresion simple (MPa)			
	Blanda < 70 MPa	Media 70 Mpa - 120MPa	Dura 120 Mpa - 180MPa	Muy Dura > 180 MPa
Burden	39Ø	37Ø	35Ø	33Ø
Espaciamiento	51Ø	47Ø	43Ø	38Ø
taco	35Ø	34Ø	32Ø	30Ø
Sobreperforacion	10Ø	11Ø	12Ø	12Ø
Longitud de carga de fondo	30Ø	35Ø	40Ø	48Ø

Fuente: Pevoex

Con las diferentes fórmulas de cálculo se obtiene el siguiente cuadro donde se aprecia los parámetros propuesto por los diferentes autores.

Nótese que las fórmulas de Ash, Konya, Walter y Konya y López Jimeno son las que proporcionan más parámetros que los demás y además consideran un mejor análisis de cálculo.



## CALCULOS CON LOS MODELOS PARA D=2.5 PULG

**MODELO MATEMATICO DE ASH**

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.

2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	80	0.84
EXAGEL-E 65	20	1.14

gr/cc

**BURDEN (pies)**

TIPO DEL EXPLOSIVO	BURDEN SEGÚN TIPO DE ROCA (pies)		
	BLANDA	MEDIA	DURA
$\rho$ (0.8 - 0.9) gr/cc	6.25	5.21	4.17
$\rho$ (1.0 - 1.2) gr/cc	7.29	6.25	5.21
$\rho$ (1.3 - 1.4) gr/cc	8.33	7.29	6.25

2.- ENTRAR EL VALOR DE LA TABLA ANTERIOR SEGÚN LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO Y TIPO DE ROCA  Pies  m

TABLA DE RANGO VALORES QUE SE PUEDE OBTENER CON EL DIAMETRO ELEGIDO

PROFUNDIDAD DEL TALADRO	:	L= [ 7.8 - 20.8 ] Pies	
ESPACIAMIENTO	:	E= 10.4 Pies	2.0 Para iniciación simultanea de Taladros
		E= 5.2 Pies	1.0 para taladros secuenciados con retardos largos
		E= [ 6.3 - 9.4 ] Pies	[1.2-1.8] para taladros secuenciados con retardos cortos
LONGITUD DEL TACO	:	T= [ 3.6 - 5.2 ] Pies	
SOBREPERFORACION	:	J=[ 1.0 - 5.2 ] Pies	

3.- ELEGIR CONSTANTES PARA LA OBTENCION DE PARAMETROS DE DISEÑO

$K_1 =$    
 $K_2 =$    
 $K_3 =$    
 $K_4 =$

4.- RESULTADOS :

BURDEN	5.21	Pies	1.59	m
ESPACIAMIENTO	6.252	Pies	1.91	m
SOBREPERFORACION	1.563	Pies	0.48	m
PROFUNDIDAD DEL TALADRO	10.42	Pies	3.18	m
LONGITUD DEL TACO	4.689	Pies	1.43	m

ELEGIR LOS VALORES DEL POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =	1.59	m
ESPACIAMIENTO =	1.91	m
SOBREPERFORACION =	0.48	m
PROFUNDIDAD DE TALADRO =	3.18	m
LONGITUD DEL TACO =	1.43	m



**MODELO MATEMATICO DE PEARSE**

**ENTRADA DE DATOS**

- 1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.
- 2.- ENTRAR EL "RQD" SEGÚN LATABLA 4
- 3.- ELEGIR EL "JSF" SEGÚN LA TABLA 1
- 4.- ELEGIR LA PRESION DE DETONACION DEL EXPLOSIVO

Elegir Explosivo	Elegir %	Presion de Detonacion (Kg/cm2)
EXSAMON P	90	32630.912
EXAGEL-E 65	10	83616.712

Presión de detonacion =  Kg/cm2

- 5.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL MATERIAL  Mpa

**6.- RESULTADOS:**

BURDEN =  metros

**MODELOS MATEMATICO DE KONYA**

**ENTRADA DE DATOS**

- 1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.
- 2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

DENSIDAD PROMEDIO DE EXPLOSIVO  gr/cc

- 5.- ENTRAR LA DENSIDAD DE LA ROCA  gr/cc
- 6.- ENTRAR LA ALTURA  Pies

**7.- RESULTADOS:**

FORMULA 1

BURDEN =  pies

ESPACIAMIENTO=  Pies

Barrenos de una fila instantaneos H < 4B E=  Pies

H ≥ 4B E=  Pies

Barrenos de una fila secuenciados H < 4B E=  Pies

H ≥ 4B E=  Pies

TACO=  Pies

SOBREPERFORACION=  Pies

ELEGIR LOS VALORES DE LOS POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =  m  
 ESPACIAMIENTO =  m  
 TACO =  m  
 SOBREPERFORACIO =  m





MODELOS MATEMATICO DE KONYA Y WALTER

FORMULA 2

BURDEN =		<input type="text" value="5.53"/>	pies	<input type="text" value="1.68"/>	m
ESPACIAMIENTO=					
Barrenos de una fila instantaneos	H < 4B	E=	<input type="text" value="10.08"/>	Pies	<input type="text" value="3.07"/>
	H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="11.05"/>	Pies	<input type="text" value="3.37"/>
Barrenos de una fila secuenciados	H < 4B	E=	<input type="text" value="7.23"/>	Pies	<input type="text" value="2.21"/>
	H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="7.74"/>	Pies	<input type="text" value="2.36"/>
TACO=		<input type="text" value="3.87"/>	Pies	<input type="text" value="1.18"/>	m
SOBREPERFORACION=		<input type="text" value="1.66"/>	Pies	<input type="text" value="0.51"/>	m

ELEGIR LOS VALORES DE LOS POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =	<input type="text" value="1.68"/>	m
ESPACIAMIENTO =	<input type="text" value="3.36"/>	m
TACO =	<input type="text" value="1.18"/>	m
SOBREPERFORACION =	<input type="text" value="0.51"/>	m

MODELO MATEMATICO DE ANDERSEN

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO 2.5 Plg
- 2.- ENTRAR LA LONGITUD DEL TALADRO 19.2 pies
- 3.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m



**MODELO MATEMATICO DE FRAENKEL**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO  plg

2.- ENTRAR LA LONGITUD DEL TALADRO  m

3.- ENTRAR LA LONGITUD DE LA CARGA  m

4.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA VOLADURA (Rv)

3.- RESULTADOS

BURDE =  pies  m

En la practica se emplea las siguientes formulas simplificadas

$0.8 B < 0.67 Lt$	$2.9763781 < 4.02$
$Lc = 0.756 Lt :$	$Lc = 4.536$ m
$E = 1.5 B$	$E = 5.5807$ m
$T = L_c / 4$	$T = 1.464$ m

**MODELO MATEMATICO DE UCAR**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg.

2.- ENTRAR LA ALTURA DE BANCO  m

3.- ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

gr/cc

1.- FACTOR DE CARGA  Kg/m

3.- RESULTADOS

BURDEN =  m  
 ESPACIAMIENTO=  m  
 LONGITU DE CARGA=  m



MODELO MATEMATCO DE FOLDESI

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg.
- 2.- ENTRAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA ROCA  Mpa
- 3.- ENTRAR EL CONSUMO ESPECIFICO DEL EXPLOSIVO (FC)  Kg/m<sup>3</sup>

4 ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)	velocidad de detonacion (m/s)
EXSAMON P	90	0.84	4800
EXAGEL-E 65	10	1.14	4800

Densidad del explosivo =  gr/cc  
Velocidad de detonacion =  m/s

5.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m

ESPACIAMIENTO =  pies  m

SOBREPERFORACION =  pies  m

MODELO MATEMATCO DE RUSTAN

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg

2.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m



**FORMULAS PRACTICAS DE LIBRO DE LOPEZ JIMENO PARA EL  
CALCULO DE VARIABLES DE DISEÑO**

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA PEQUEÑO DIAMETRO

2.5 Plg.

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA GRAN DIAMETRO

8.25 Plg.

**VOLADURA DE BANCO CON PEQUEÑO DIAMETRO**

DIAMETRO DEL BARRENO (mm)	Produccion horaria media (m3/hr)	
	Roca blanda - media < 120MPa	Roca dura - muy dura > 120MPa
85	190	60
89	250	110
150	550	270

Altura de Banco H(m)	Diametro del barreno Ø(m)	Equipo de Carga Recomendado
8 - 50	65 - 90	Pala de Ruedas
10 - 15	100 - 150	Excavadora hidraulica o de cables

Variable de diseño	Resistencia a la compresion simple (MPa)			
	Blanda < 70 Mpa	Media 70 Mpa - 120MPa	Dura 120 Mpa - 180MPa	Muy Dura > 180 MPa
Burden (m)	2.48	2.35	2.22	2.03
Espaciamiento (m)	3.24	2.98	2.73	2.41
taco (m)	2.22	2.16	2.03	1.91
Sobreperforacion (m)	0.64	0.70	0.76	0.76
Longitud de carga de fondo (m)	1.91	2.22	2.54	3.05

BURDEN =	2.35 m
ESPACIAMIENTO =	2.98 m
TACO =	2.16 m
SOBREPERFORACION =	0.7 m
LONGITUD DE CARGA DE FONDO =	2.22 m



## CALCULOS CON LOS MODELOS PARA D=3.0 PULG

MODELO MATEMATICO DE ASH

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.

2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

gr/cc

TIPO DEL EXPLOSIVO	BURDEN SEGÚN TIPO DE ROCA (pies)		
	BLANDA	MEDIA	DURA
$\rho$ ( 0.8 - 0.9 ) gr/cc	7.50	6.25	5.00
$\rho$ ( 1.0 - 1.2 ) gr/cc	8.75	7.50	6.25
$\rho$ ( 1.3 - 1.4 ) gr/cc	10.00	8.75	7.50

2.- ENTRAR EL VALOR DE LA TABLA ANTERIOR SEGÚN LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO Y TIPO DE ROCA  Pies  m

TABLA DE RANGO VALORES QUE SE PUEDE OBTENER CON EL DIAMETRO ELEGIDO	
PROFUNDIDAD DEL TALADRO	L= [ 9.4 - 25.0 ] Pies
ESPACIAMIENTO	E= 12.5 Pies 2.0 Para iniciación simultanea de Taladros
	E= 6.3 Pies 1.0 para taladros secuenciados con retardos largos
	E= [ 7.5 - 11.3 ] Pies [1.2-1.8] para taladros secuenciados con retardos cortos
LONGITUD DEL TACO	T= [ 4.4 - 6.3 ] Pies
SOBREPERFORACION	J=[ 1.3 - 6.3 ] Pies

3.- ELEGIR CONSTANTES PARA LA OBTENCION DE PARAMETROS DE DISEÑO

$K_1 =$

$K_2 =$

$K_3 =$

$K_4 =$

4.- RESULTADOS :

BURDEN	6.25 Pies	1.91 m
ESPACIAMIENTO	7.5 Pies	2.29 m
SOBREPERFORACION	1.875 Pies	0.57 m
PROFUNDIDAD DEL TALADRO	12.5 Pies	3.81 m
LONGITUD DEL TACO	5.625 Pies	1.71 m

ELEGIR LOS VALORES DEL POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =  m

ESPACIAMIENTO =  m

SOBREPERFORACION =  m

PROFUNDIDAD DE TALADRO =  m



**MODELO MATEMATICO DE PEARSE**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.

2.- ENTRAR EL "RQD" SEGÚN LATABLEA 4

3.- ELEGIR EL "JSF" SEGÚN LA TABLA 1

4.- ELEGIR LA PRESION DE DETONACION DEL EXPLOSIVO

Elegir Explosivo	Elegir %	Presion de Detonacion (Kg/cm2)
EXSAMON P	90	32630.912
EXAGEL-E 65	10	83616.712

Presión de detonacion =  Kg/cm<sup>2</sup>

5.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL MATERIAL  Mpa

6.- RESULTADOS:

BURDEN =  metros

**MODELOS MATEMATICO DE KONYA**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.

2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

DENSIDAD PROMEDIO DE EXPLOSIVO  gr/cc

5.- ENTRAR LA DENSIDAD DE LA ROCA  gr/cc

6.- ENTRAR LA ALTURA  Pies

7.- RESULTADOS:

FORMULA 1

BURDEN =  pies  m

ESPACIAMIENTO=

Barrenos de una fila instantaneos

H < 4B	E=	<input type="text" value="10.88"/> Pies	<input type="text" value="3.32"/> m
H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="13.43"/> Pies	<input type="text" value="4.09"/> m

Barrenos de una fila secuenciados

H < 4B	E=	<input type="text" value="8.28"/> Pies	<input type="text" value="2.52"/> m
H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="9.40"/> Pies	<input type="text" value="2.87"/> m

TACO=  Pies  m

SOBREPERFORACION=  Pies  m

ELEGIR LOS VALORES DE LOS POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =	<input type="text" value="2.05"/> m
ESPACIAMIENTO =	<input type="text" value="3.33"/> m
TACO =	<input type="text" value="1.43"/> m
SOBREPERFORACION =	<input type="text" value="0.61"/> m



MODELOS MATEMATICO DE KONYA Y WALTER

FORMULA 2

BURDEN =			<input type="text" value="6.63"/>	Pies	<input type="text" value="2.02"/>	m
ESPACIAMIENTO=						
Barrenos de una fila instantaneos	H < 4B	E=	<input type="text" value="10.82"/>	Pies	<input type="text" value="3.30"/>	m
	H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="13.26"/>	Pies	<input type="text" value="4.04"/>	m
Barrenos de una fila secuenciados	H < 4B	E=	<input type="text" value="8.20"/>	Pies	<input type="text" value="2.50"/>	m
	H ≥ 4B	E=	<input type="text" value="9.28"/>	Pies	<input type="text" value="2.83"/>	m
TACO=			<input type="text" value="4.64"/>	Pies	<input type="text" value="1.41"/>	m
SOBREPERFORACION=			<input type="text" value="1.99"/>	Pies	<input type="text" value="0.61"/>	m

GIR LOS VALORES DE LOS POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =	<input type="text" value="2.02"/>	m
ESPACIAMIENTO =	<input type="text" value="3.31"/>	m
TACO =	<input type="text" value="1.41"/>	m
SOBREPERFORACION =	<input type="text" value="0.61"/>	m

MODELO MATEMATICO DE ANDERSEN

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO 3 Plg
- 2.- ENTRAR LA LONGITUD DEL TALADRO 19.2 pies
- 3.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m





**MODELO MATEMATICO DE FRAENKEL**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO  plg

2.- ENTRAR LA LONGITUD DEL TALADRO  m

3.- ENTRAR LA LONGITUD DE LA CARGA  m

4.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA VOLADURA (Rv)

3.- RESULTADOS

BURDE =  pies  m

En la practica se emplea las siguientes formulas simplificadas

<input type="text" value="0.8 B &lt; 0.67 Lt"/>	<input type="text" value="3.4437617 &lt; 4.02"/>
<input type="text" value="Lc = 0.756 Lt :"/>	<input type="text" value="Lc = 4.536 m"/>
<input type="text" value="E = 1.5 B"/>	<input type="text" value="E = 6.4571 m"/>
<input type="text" value="T = Lc / 4"/>	<input type="text" value="T = 1.464 m"/>



**MODELO MATEMATCO DE UCAR**

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg.

2.- ENTRAR LA ALTURA DE BANCO  m

3.- ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

gr/cc

1.- FACTOR DE CARGA  Kg/m

3.- RESULTADOS

BURDEN =  m  
ESPACIAMIENTO=  m  
LONGITU DE CARGA=  m

**MODELO MATEMATCO DE RUSTAN**

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg.

2.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m



MODELO MATEMATICO DE FOLDESI

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO

Plg.

2.- ENTRAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA ROCA

Mpa

3.- ENTRAR EL CONSUMO ESPECIFICO DEL EXPLOSICO (FC)

Kg/m<sup>3</sup>

4 ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)	velocidad de detonacion (m/s)
EXSAMON P	90	0.84	4800
EXAGEL-E 65	10	1.14	4800

Densidad del explosivo =  gr/cc  
Velocidad de detonacion =  m/s

5.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m

ESPACIAMIENTO =  pies  m

SOBREPERFORACION =  pies  m



FORMULAS PRACTICOS DE LIBRO DE LOPEZ JIMENO PARA EL  
CALCULO DE VARIABLES DE DISEÑO

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA PEQUEÑO DIAMETRO

3 Plg.

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA GRAN DIAMETRO

8.25 Plg.

**VOLADURA DE BANCO CON PEQUEÑO DIAMETRO**

DIAMETRO DEL BARRENO (mm)	Produccion horaria media (m3/hr)	
	Roca blanda - media < 120MPa	Roca dura - muy dura > 120MPa
85	190	60
89	250	110
150	550	270

Altura de Banco H(m)	Diametro del barreno Ø(m)	Equipo de Carga Recomendado
8 - 50	65 - 90	Pala de Ruedas
10 - 15	100 - 150	Excavadora hidraulica o de cables

Variable de diseño	Resistencia a la compresion simple (MPa)			
	Blanda < 70 Mpa	Media 70 Mpa - 120MPa	Dura 120 Mpa - 180MPa	Muy Dura > 180 MPa
Burden (m)	2.97	2.82	2.67	2.44
Espaciamiento (m)	3.89	3.58	3.28	2.90
taco (m)	2.67	2.59	2.44	2.29
Sobreperforacion (m)	0.76	0.84	0.91	0.91
Longitud de carga de fondo (m)	2.29	2.67	3.05	3.66

BURDEN =	<input type="text"/> 2.82	m
ESPACIAMIENTO =	<input type="text"/> 3.58	m
TACO =	<input type="text"/> 2.59	m
SOBREPERFORACION =	<input type="text"/> 0.84	m
LONGITUD DE CARGA DE FONDO =	<input type="text"/> 2.67	m



## CALCULOS CON LOS MODELOS PARA D=3.5 PULG

**MODELO MATEMATICO DE ASH**

**ENTRADA DE DATOS**

1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.

2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

gr/cc

**BURDEN (pies)**

TIPO DEL EXPLOSIVO	BURDEN SEGÚN TIPO DE ROCA (pies)		
	BLANDA	MEDIA	DURA
$\rho$ ( 0.8 - 0.9 ) gr/cc	8.75	7.29	5.83
$\rho$ ( 1.0 - 1.2 ) gr/cc	10.21	8.75	7.29
$\rho$ ( 1.3 - 1.4 ) gr/cc	11.67	10.21	8.75

2.- ENTRAR EL VALOR DE LA TABLA ANTERIOR SEGÚN LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO Y TIPO DE ROCA  Pies  m

**TABLA DE RANGO VALORES QUE SE PUEDE OBTENER CON EL DIAMETRO ELEGIDO**

PROFUNDIDAD DEL TALADRO	:	L= [ 10.9 - 29.2 ] Pies	
ESPACIAMIENTO	:	E= 14.6 Pies	2.0 Para iniciacion simultanea de Taladros
	:	E= 7.3 Pies	1.0 para taladros secuenciados con retardos largos
	:	E= [ 8.7 - 13.1 ] Pies	[1.2-1.8] para taladros secuenciados con retardos cortos
LONGITUD DEL TACO	:	T= [ 5.1 - 7.3 ] Pies	
SOBREPERFORACION	:	J=[ 1.5 - 7.3 ] Pies	

3.- ELEGIR CONSTANTES PARA LA OBTENCION DE PARAMETROS DE DISEÑO

$K_1 =$

$K_e =$

$K_i =$

$K_s =$

4.- RESULTADOS :

BURDEN	7.29 Pies	2.22 m
ESPACIAMIENTO	8.748 Pies	2.67 m
SOBREPERFORACION	2.187 Pies	0.67 m
PROFUNDIDAD DEL TALADRO	14.58 Pies	4.44 m
LONGITUD DEL TACO	6.561 Pies	2.00 m

ELEGIR LOS VALORES DEL POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =	2.22	m
ESPACIAMIENTO =	2.67	m
SOBREPERFORACION =	0.67	m
PROFUNDIDAD DE TALADRO =	4.44	m
LONGITUD DEL TACO =	2.00	m



**MODELO MATEMATICO DE PEARSE**

**ENTRADA DE DATOS**

- 1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.
- 2.- ENTRAR EL "RQD" SEGÚN LATABLA 4
- 3.- ELEGIR EL "JSF" SEGÚN LA TABLA 1
- 4.- ELEGIR LA PRESION DE DETONACION DEL EXPLOSIVO

Elegir Explosivo	Elegir %	Presion de Detonacion (Kg/cm2)
EXSAMON P	90	32630.912
EXAGEL-E 65	10	83616.712

Presión de detonacion =  Kg/cm2

- 5.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL MATERIAL  Mpa

6.- RESULTADOS:

BURDEN =  metros

**MODELOS MATEMATICO DE KONYA**

**ENTRADA DE DATOS**

- 1.- ENTRAR EL VALOR DEL DIAMETRO  plgs.
- 2.- ELEGIR LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO ( VER TABLA)

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

DENSIDAD PROMEDIO DE EXPLOSIVO  gr/cc

- 5.- ENTRAR LA DENSIDAD DE LA ROCA  gr/cc

- 6.- ENTRAR LA ALTURA  Pies

7.- RESULTADOS:

FORMULA 1

BURDEN =  pies  m

ESPACIAMIENTO=

Barrenos de una fila instantaneos H < 4B E=  Pies  m  
H ≥ 4B E=  Pies  m

Barrenos de una fila secuenciados H < 4B E=  Pies  m  
H ≥ 4B E=  Pies  m

TACO=  Pies  m

SOBREPERFORACION=  Pies  m

ELEGIR LOS VALORES DE LOS POSIBLES PARAMETROS A UTILIZAR

BURDEN =  m  
ESPACIAMIENTO =  m  
TACO =  m  
SOBREPERFORACION =  m







MODELO MATEMATICO DE FRAENKEL

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO  plg
- 2.- ENTRAR LA LONGITUD DEL TALADRO  m
- 3.- ENTRAR LA LONGITUD DE LA CARGA  m
- 4.- ENTRAR EL VALOR DE LA RESISTENCIA A LA VOLADURA (Rv)

3.- RESULTADOS

BURDE =  pies  m

En la practica se emplea las siguientes formulas simplificadas

<

m

m

m

MODELO MATEMATCO DE UCAR

ENTRADA DE DATOS

- 1.- ENTRAR EL DIAMETRO  Plg.
- 2.- ENTRAR LA ALTURA DE BANCO  m
- 3.- ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)
EXSAMON P	90	0.84
EXAGEL-E 65	10	1.14

gr/cc

- 1.- FACTOR DE CARGA  Kg/m

3.- RESULTADOS

BURDEN =  m  
 ESPACIAMIENTO=  m  
 LONGITU DE CARGA=  m



MODELO MATEMATCO DE FOLDESI

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO

Plg.

2.- ENTRAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA ROCA

Mpa

3.- ENTRAR EL CONSUMO ESPECIFICO DEL EXPLOSICO (FC)

Kg/m3

4 ELEGIR LOS EXPLOSIVOS A UTILIZAR

Elegir Explosivo	Elegir %	Densidad del Explosivo (gr/cc)	velocidad de detonacion (m/s)
EXSAMON P	80	0.84	4800
EXAGEL-E 65	20	1.14	4800

Densidad del explosivo =  gr/cc  
Velocidad de detonacion =  m/s

5.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m

ESPACIAMIENTO =  pies  m

SOBREPERFORACION =  pies  m

MODELO MATEMATCO DE RUSTAN

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR EL DIAMETRO

Plg.

2.- RESULTADOS

BURDEN =  pies  m



**FORMULAS PRACTICOS DE LIBRO DE LOPEZ JIMENO PARA EL  
 CALCULO DE VARIABLES DE DISEÑO**

ENTRADA DE DATOS

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA PEQUEÑO DIAMETRO

3.5 Plg.

1.- ENTRAR DIAMETRO A UTILIZAR PARA GRAN DIAMETRO

8.25 Plg.

**VOLADURA DE BANCO CON PEQUEÑO DIAMETRO**

DIAMETRO DEL BARRENO (mm)	Produccion horaria media (m <sup>3</sup> /hr)	
	Roca blanda - media < 120MPa	Roca dura - muy dura > 120MPa
85	190	60
89	250	110
150	550	270

Altura de Banco H(m)	Diametro del barreno Ø(m)	Equipo de Carga Recomendado
8 - 50	65 - 90	Pala de Ruedas
10 - 15	100 - 150	Excavadora hidraulica o de cables

Variable de diseño	Resistencia a la compresion simple (MPa)			
	Blanda < 70 Mpa	Media 70 Mpa - 120MPa	Dura 120 Mpa - 180MPa	Muy Dura > 180 MPa
Burden (m)	3.47	3.29	3.11	2.84
Espaciamiento (m)	4.53	4.18	3.82	3.38
taco (m)	3.11	3.02	2.84	2.67
Sobreperforacion (m)	0.89	0.98	1.07	1.07
Longitud de carga de fondo (m)	2.67	3.11	3.56	4.27

BURDEN = 3.29 m  
 ESPACIAMIENTO = 4.18 m  
 TACO = 3.02 m  
 SOBREPERFORACION = 0.98 m  
 LONGITUD DE CARGA DE FONDO = 3.11 m



A continuación se muestran cuadros con los parámetros de perforación y voladura obtenidos con los modelos matemáticos de diseño más comunes revisados en las diferentes bibliografías, para diámetros de 2.5 pulg, 3.0 pulg y 3.5 pulg.

Nótese que la mayoría de los parámetros aumenta conforme aumenta el diámetro de perforación, debido a que puede confinar una mayor cantidad de masa explosiva.

Debido a ello se puede perforar con brocas de mayor diámetro para lograr una mayor producción ampliando las mallas de perforación (burden y espaciamiento) con un mismo factor de carga.

**Tabla 4.4: Parámetros de diseño para D=2.5 pulg.**

PARAMETROS DE DISEÑO	ASH	PEARSE	KONYA	KONYA Y W	ANDERSEN	FRAENKEL	UCAR	FOLDESI	RUSTAN	LOPEZ JIMENO
BURDEN	1.59	1.48	1.71	1.68	2.11	3.72	2.47	3.58	2.71	2.35
ESPACIAMIENTO	1.91	0.00	3.37	3.36	0.00	5.58	2.47	3.71	0.00	2.98
SOBRE PERFORACION	0.48		0.51	0.51				1.07		0.70
ALTURA DE BANCO										
LONGITUD DE TALADRO	3.18									
TACO	1.43		1.19	1.18		1.46				2.16

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.5: Parámetros de diseño para D=3.0 pulg.**

PARAMETROS DE DISEÑO	ASH	PEARSE	KONYA	KONYA Y W	ANDERSEN	FRAENKEL	UCAR	FOLDESI	RUSTAN	LOPEZ JIMENO
BURDEN	1.91	1.78	2.05	2.02	2.31	4.30	2.87	4.30	3.07	2.82
ESPACIAMIENTO	2.29	0.00	3.33	3.31	0.00	6.46	2.87	4.45	0.00	3.58
SOBRE PERFORACION	0.57		0.61	0.61				1.29		0.84
ALTURA DE BANCO										
LONGITUD DE TALADRO	3.81									
TACO	1.71		1.43	1.41		1.46				2.59

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.6: Parámetros de diseño para D=3.5 pulg.**

PARAMETROS DE DISEÑO	ASH	PEARSE	KONYA	KONYA Y W	ANDERSEN	FRAENKEL	UCAR	FOLDESI	RUSTAN	LOPEZ JIMENO
BURDEN	2.22	2.07	2.39	2.36	2.50	4.87	3.24	5.10	3.42	3.29
ESPACIAMIENTO	2.67	0.00	3.56	3.54	0.00	7.30	3.24	5.28	0.00	4.18
SOBRE PERFORACION	0.67		0.72	0.71				1.53		0.98
ALTURA DE BANCO										
LONGITUD DE TALADRO	4.44									
TACO	2.00		1.67	1.65		1.46				3.02

*Fuente: Elaboración propia*



## INDICADORES DE PERFORACION Y VOLADURA

A continuación mostramos los datos tomados de campo en las diferentes frentes de trabajo de voladuras en tajo abierto o superficie en la construcción de la Central Hidroeléctrica Chaglla. Separados por frente y por diámetro de perforación.

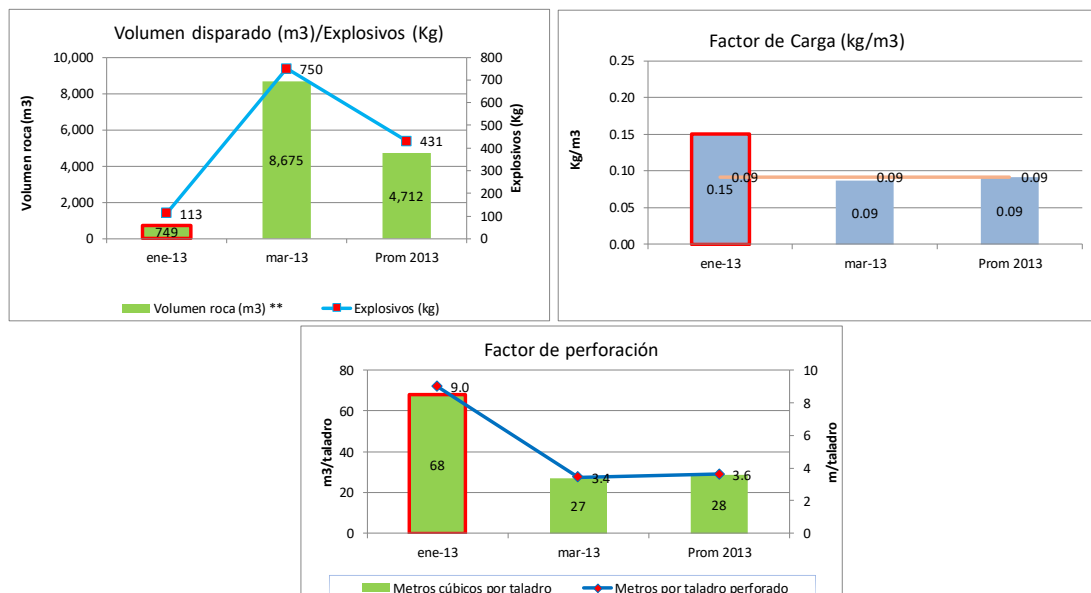
### ACP18

**Tabla 4.7:** Indicadores de perforación y voladura **ACP18 D=2.5 pulg**

Item	ACP18 D=2.5 pulg INDICADOR	Unid.	ene-13	mar-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	749	8,675	4,712	9,424
2	Explosivos (kg)	kg	113	750	431	863
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.15	0.09	0.09	0.09
4	Metros perforados *	m	99	1,099	599	1,198
5	Taladros perforados *	u	11	320	166	331
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	68	27	28	28
7	Metros por taladro perforado	m/tal	9.0	3.4	3.6	3.6
8	Burden promedio	m	2.6	2.7	2.7	
9	Espaciamiento promedio	m	3.0	3.0	3.0	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.2:** Indicadores de perforación y voladura **ACP18 D=2.5 pulg**



*Fuente: Elaboración propia*

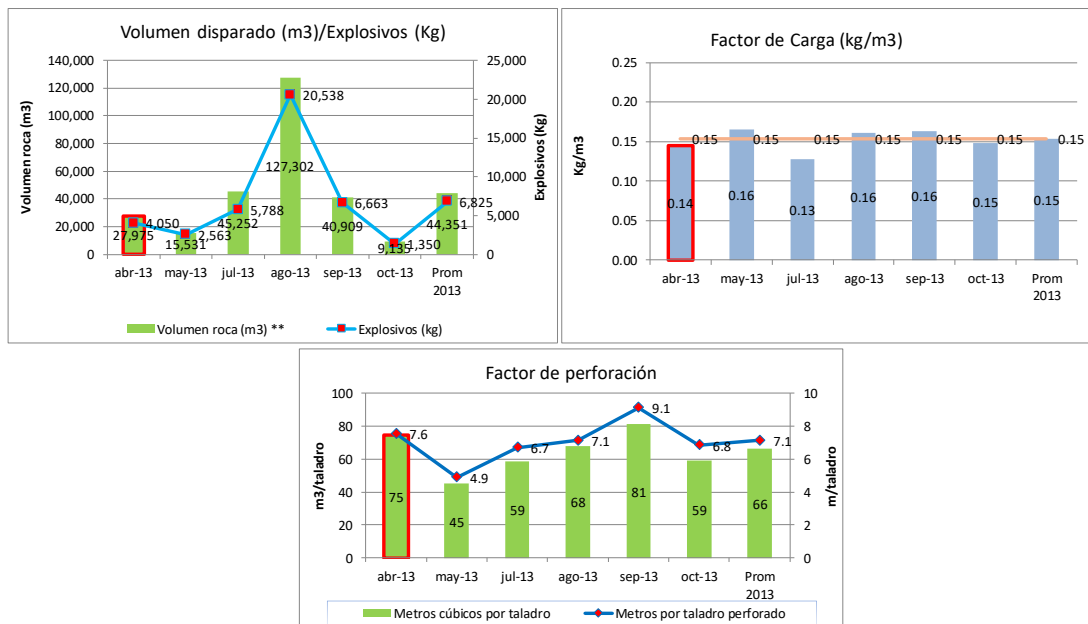
**Tabla 4.8:** Indicadores de perforación y voladura **ACP18 D=3.0 pulg**



Item	ACP18 D=3 pulg INDICADOR	Unid.	abr-13	may-13	jul-13	ago-13	sep-13	oct-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	27,975	15,531	45,252	127,302	40,909	9,135	44,351	266,104
2	Explosivos (kg)	kg	4,050	2,563	5,788	20,538	6,663	1,350	6,825	40,950
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.14	0.16	0.13	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
4	Metros perforados *	m	2,827	1,686	5,177	13,332	4,593	1,055	4,778	28,670
5	Taladros perforados *	u	374	345	772	1,869	503	154	670	4,017
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	75	45	59	68	81	59	66	66
7	Metros por taladro perforado	m/tal	7.6	4.9	6.7	7.1	9.1	6.8	7.1	7.1
8	Burden promedio	m	3.0	3.0	3.0	3.1	2.9	3.0	3.0	3.0
9	Espaciamiento promedio	m	3.4	3.3	3.1	3.2	3.0	3.0	3.2	3.2

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.3: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.0 pulg**



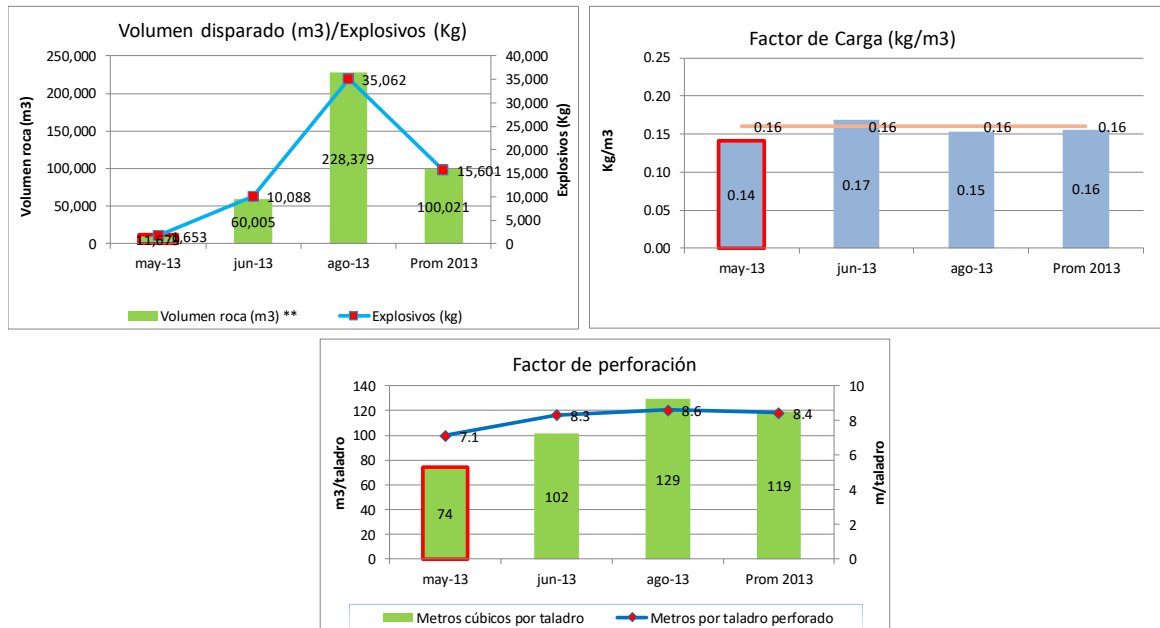
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.9: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.5 pulg**

Item	ACP18 D=3.5 pulg INDICADOR	Unid.	may-13	jun-13	ago-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	11,679	60,005	228,379	100,021	300,063
2	Explosivos (kg)	kg	1,653	10,088	35,062	15,601	46,802
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.14	0.17	0.15	0.16	0.16
4	Metros perforados *	m	1,119	4,913	15,229	7,087	21,260
5	Taladros perforados *	u	157	591	1,768	839	2,516
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	74	102	129	119	119
7	Metros por taladro perforado	m/tal	7.1	8.3	8.6	8.4	8.4
8	Burden promedio	m	3.2	3.3	3.9	3.5	3.5
9	Espaciamiento promedio	m	3.2	3.7	3.9	3.6	3.6

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.4: Indicadores de perforación y voladura ACP18 D=3.5 pulg**



*Fuente: Elaboración propia*

Se observa en los gráficos volumen vs explosivos que para mover una determinado volumen la cantidad de explosivos es directamente proporcional. Siendo el comportamiento de la relación **explosivos: volumen de roca** (factor de carga) de manera constante.

**Tabla 4.10: Indicadores de perforación y voladura por diámetro ACP18**

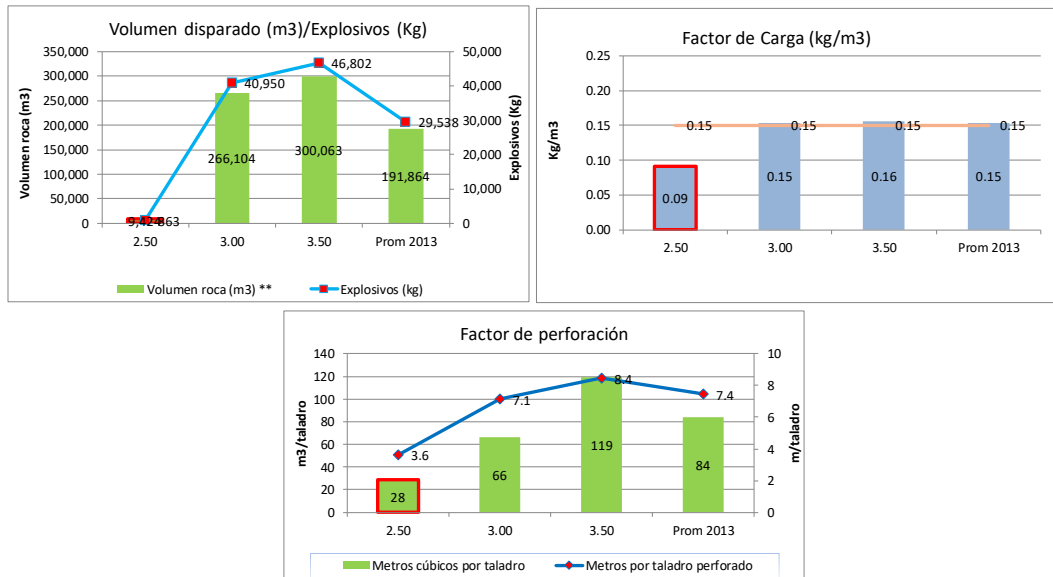
Item	ACP18 DIAMETRO INDICADOR	Unid.	2.50	3.00	3.50	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	9,424	266,104	300,063	191,864	575,592
2	Explosivos (kg)	kg	863	40,950	46,802	29,538	88,615
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.09	0.15	0.16	0.15	0.15
4	Metros perforados *	m	1,198	28,670	21,260	17,043	51,128
5	Taladros perforados *	u	331	4,017	2,516	2,288	6,864
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	28	66	119	84	84
7	Metros por taladro perforado	m/tal	3.6	7.1	8.4	7.4	7.4
8	Burden promedio	m	2.7	3.0	3.5	3.0	
9	Espaciamiento promedio	m	3.0	3.2	3.6	3.3	

*Fuente: Elaboración propia*





Imagen 4.5: Indicadores de perforación y voladura por diámetro ACP18



Fuente: Elaboración propia

En general se nota que el factor de carga se comporta de manera constante sin importar el diámetro de perforación.



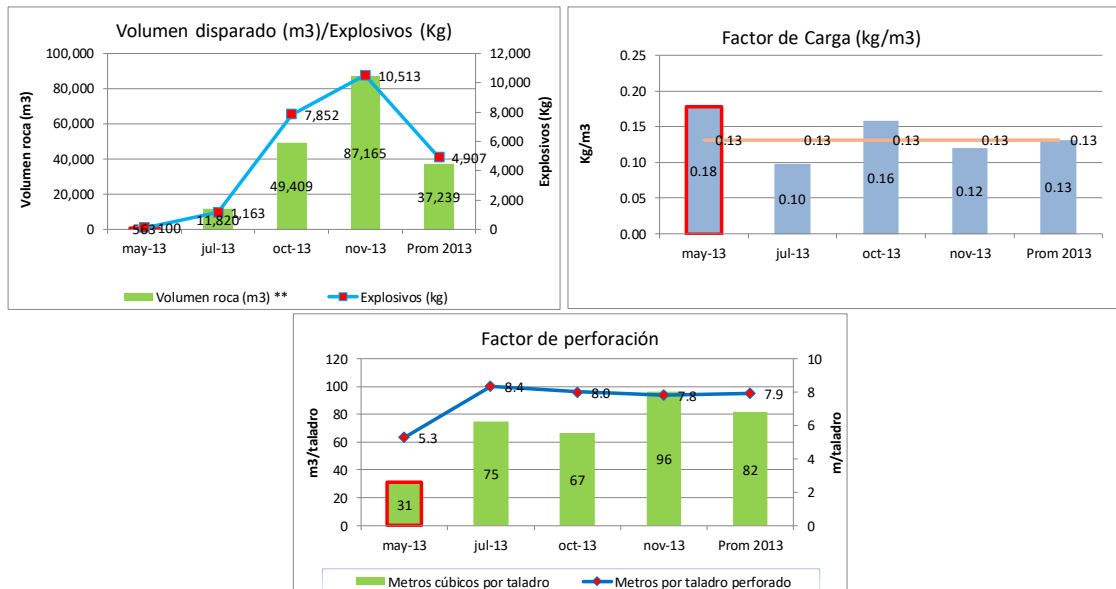
### CANTERA 21

**Tabla 4.11:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg **CANTERA 21**

Item	CANTERA 21 D=3 PULG INDICADOR	Unid.	may-13	jul-13	oct-13	nov-13	Prom	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	563	11,820	49,409	87,165	37,239	148,956
2	Explosivos (kg)	kg	100	1,163	7,852	10,513	4,907	19,627
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.18	0.10	0.16	0.12	0.13	0.13
4	Metros perforados *	m	95	1,321	5,936	7,099	3,613	14,451
5	Taladros perforados *	u	18	158	742	907	456	1,825
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	31	75	67	96	82	82
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.3	8.4	8.0	7.8	7.9	7.9
8	Burden promedio	m	2.5	2.9	2.7	3.3	2.8	
9	Espaciamiento promedio	m	2.5	3.2	2.7	3.7	3.0	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.6:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 **CANTERA 21**



*Fuente: Elaboración propia*

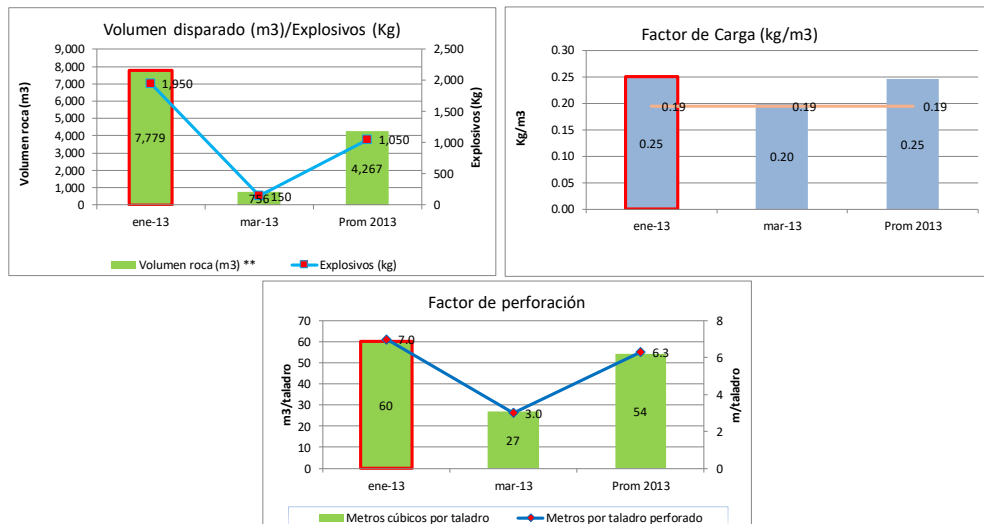
### CANTERA 19

**Tabla 4.12: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA 19**

Item	CANTERA 19 D=2.5 pulg INDICADOR	Unid.	ene-13	mar-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	4,437	756	2,597	5,193
2	Explosivos (kg)	kg	863	150	506	1,013
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.19	0.20	0.19	0.19
4	Metros perforados *	m	493	84	289	577
5	Taladros perforados *	u	146	28	87	174
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	30	27	30	30
7	Metros por taladro perforado	m/tal	3.4	3.0	3.3	3.3
8	Burden promedio	m	3.0	3.0	3.0	
9	Espaciamiento promedio	m	3.0	3.0	3.0	

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.7: Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg CANTERA 19**



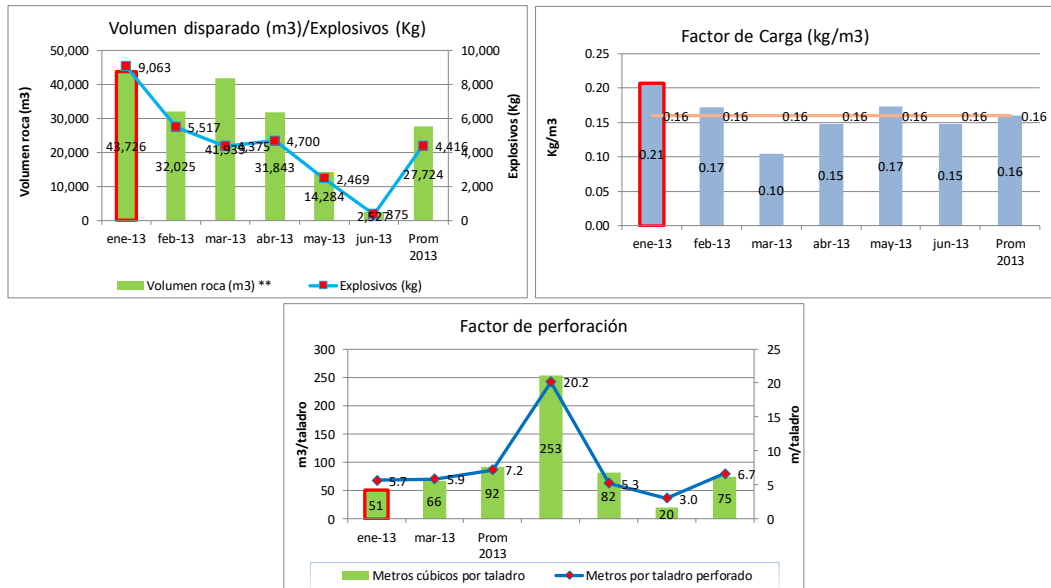
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.13: Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg CANTERA 19**

Item	CANTERA 19 D=3 pulg INDICADOR	Unid.	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	43,726	32,025	41,939	31,843	14,284	2,527	27,724	166,342
2	Explosivos (kg)	kg	9,063	5,517	4,375	4,700	2,469	375	4,416	26,499
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.21	0.17	0.10	0.15	0.17	0.15	0.16	0.16
4	Metros perforados *	m	4,905	2,839	3,277	2,541	915	387	2,477	14,863
5	Taladros perforados *	u	863	484	456	126	174	129	372	2,232
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	51	66	92	253	82	20	75	75
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.7	5.9	7.2	20.2	5.3	3.0	6.7	6.7
8	Burden promedio	m	3.0	3.0	3.4	3.2	3.5	2.4	3.1	
9	Espaciamiento promedio	m	3.0	3.0	3.4	3.2	3.5	2.8	3.1	

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.8:** Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg **CANTERA 19**



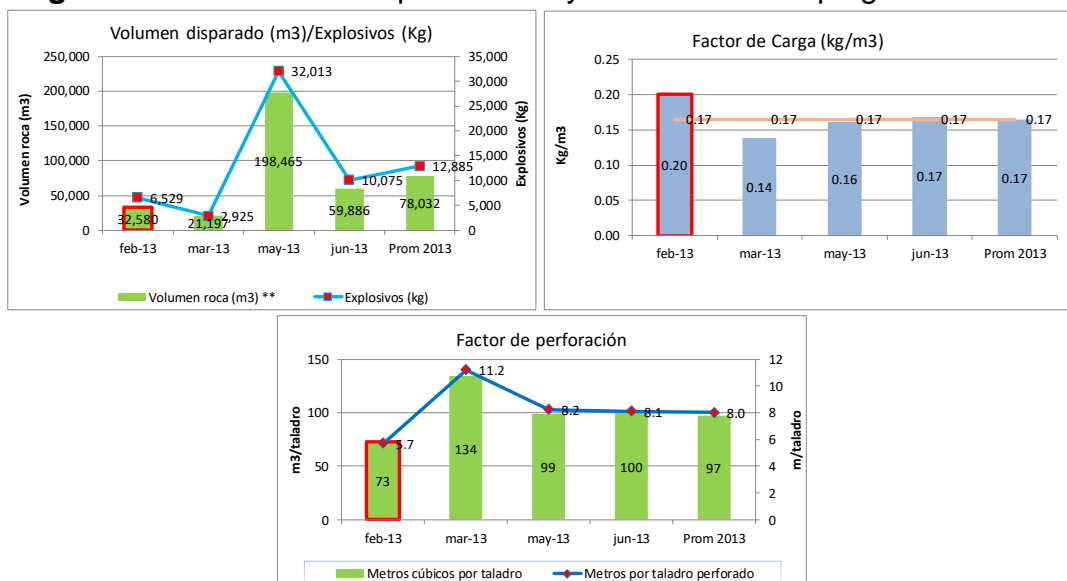
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.14:** Indicadores de perforación y voladura D=3.5 pulg **CANTERA 19**

Item	CANTERA 19 D=3.5 pulg INDICADOR	Unid.	feb-13	mar-13	may-13	jun-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	32,580	21,197	198,465	59,886	78,032	312,127
2	Explosivos (kg)	kg	6,529	2,925	32,013	10,075	12,885	51,542
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.20	0.14	0.16	0.17	0.17	0.17
4	Metros perforados *	m	2,566	1,770	16,513	4,841	6,423	25,690
5	Taladros perforados *	u	448	158	2,003	597	802	3,206
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	73	134	99	100	97	97
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.7	11.2	8.2	8.1	8.0	8.0
8	Burden promedio	m	3.6	3.5	3.4	3.4	3.5	
9	Espaciamiento promedio	m	3.6	3.5	3.4	3.6	3.5	

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.9:** Indicadores de perforación y voladura D=3.5 pulg **CANTERA 19**



Fuente: Elaboración propia



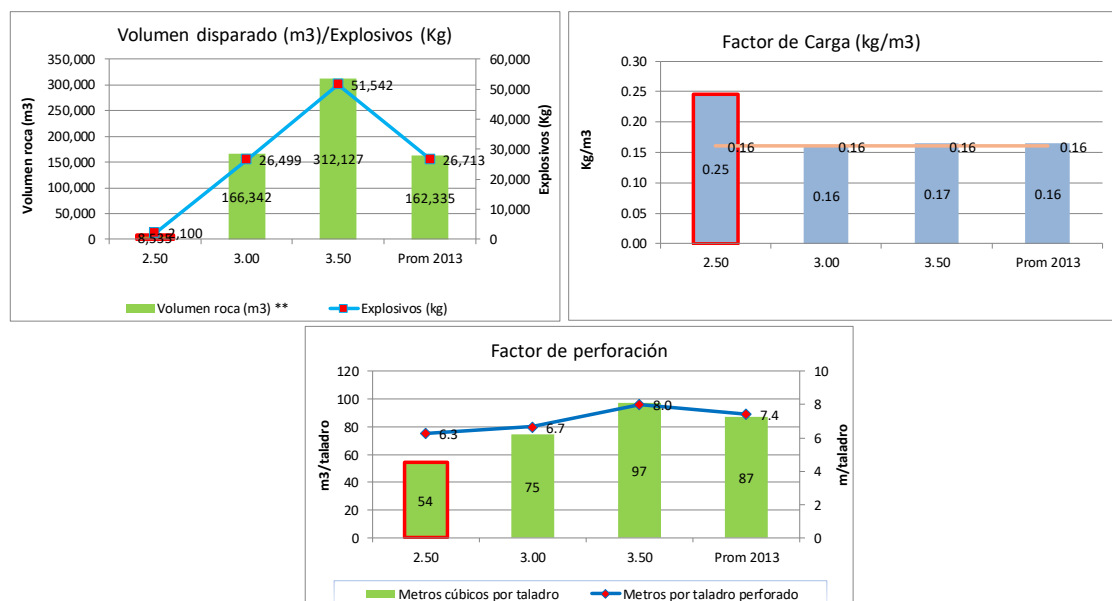
Al igual que el frente ACP18 el factor de carga tiene una variación pequeña a pesar de aumentar el volumen de disparo de manera considerable.

**Tabla 4.15:** Indicadores de perforación y voladura por diámetro **CANTERA 19**

Item	CANTERA 19 DIAMETRO INDICADOR	Unid.	2.50	3.00	3.50	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	5,193	166,342	312,127	161,221	483,662
2	Explosivos (kg)	kg	1,013	26,499	51,542	26,351	79,053
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.19	0.16	0.17	0.16	0.16
4	Metros perforados *	m	577	14,863	25,690	13,710	41,131
5	Taladros perforados *	u	174	2,232	3,206	1,871	5,612
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	30	75	97	86	86
7	Metros por taladro perforado	m/tal	3.3	6.7	8.0	7.3	7.3
8	Burden promedio	m	3.0	3.1	3.5	3.2	
9	Espaciamiento promedio	m	3.0	3.1	3.5	3.2	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.10:** Indicadores de perforación y voladura por diámetro **CANTERA 19**



*Fuente: Elaboración propia*

En resumen de la misma manera se aprecia el factor de carga se mantiene cercano pese a las fluctuaciones considerable del volumen de disparo.

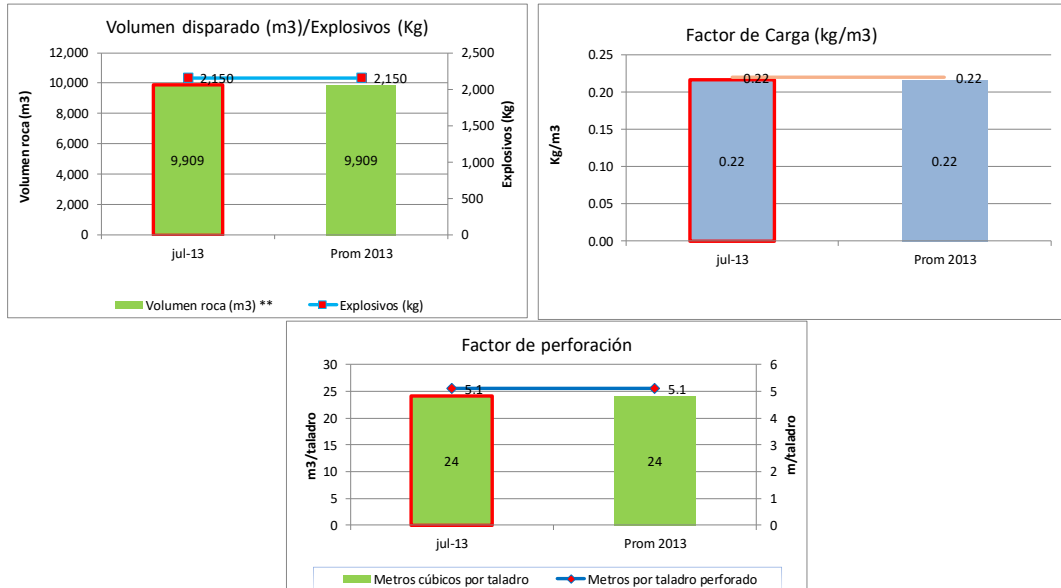
## CANTERA 20

**Tabla 4.16:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg **CANTERA20**

Item	CANTERA 20 D=2.5 pulg INDICADOR	Unid.	jul-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	9,909	9,909	9,909
2	Explosivos (kg)	kg	2,150	2,150	2,150
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.22	0.22	0.22
4	Metros perforados *	m	2,097	2,097	2,097
5	Taladros perforados *	u	411	411	411
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	24	24	24
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.1	5.1	5.1
8	Burden promedio	m	2.7	2.7	
9	Espaciamiento promedio	m	2.8	2.8	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.11:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg **CANTERA20**



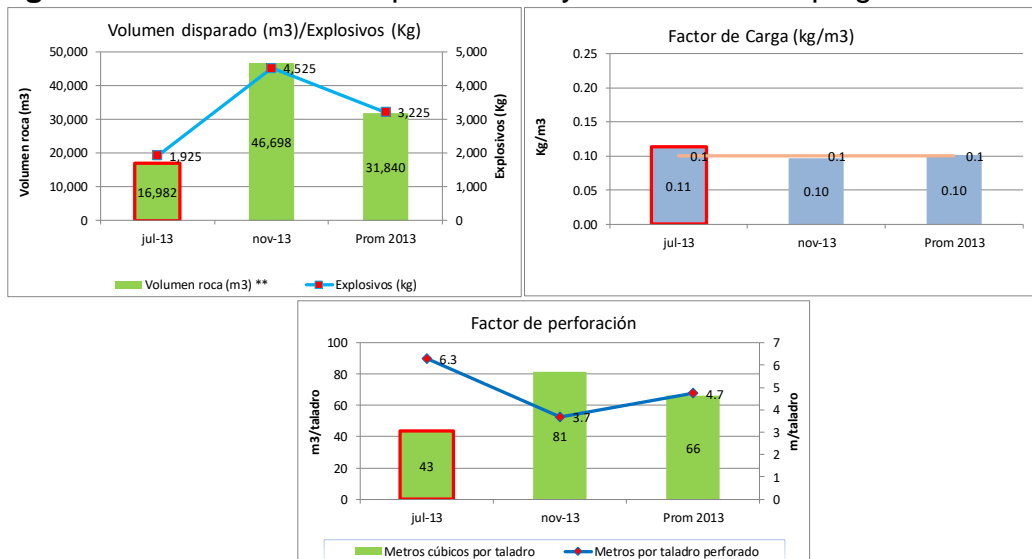
*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.17:** Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg **CANTERA 20**

Item	CANTERA 20 D=3 pulg INDICADOR	Unid.	jul-13	nov-13	Prom	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	16,982	46,698	31,840	63,680
2	Explosivos (kg)	kg	1,925	4,525	3,225	6,450
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.11	0.10	0.10	0.10
4	Metros perforados *	m	2,465	2,117	2,291	4,582
5	Taladros perforados *	u	391	574	483	965
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	43	81	66	66
7	Metros por taladro perforado	m/tal	6.3	3.7	4.7	4.7
8	Burden promedio	m	2.6	3.1	2.8	
9	Espaciamiento promedio	m	2.7	3.3	3.0	

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.12:** Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg **CANTERA 20**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.18:** Indicadores de perforación y voladura por diámetro **CANTERA 20**

Item	CANTERA 20 DIAMETRO INDICADOR	Unid.	2.50	3.00	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	9,909	63,680	36,795	73,589
2	Explosivos (kg)	kg	2,150	6,450	4,300	8,600
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.22	0.10	0.12	0.12
4	Metros perforados *	m	2,097	4,582	3,340	6,679
5	Taladros perforados *	u	411	965	688	1,376
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	24	66	53	53
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.1	4.7	4.9	4.9
8	Burden promedio	m	2.7	2.8	2.8	
9	Espaciamiento promedio	m	2.8	3.0	2.9	

Fuente: Elaboración propia





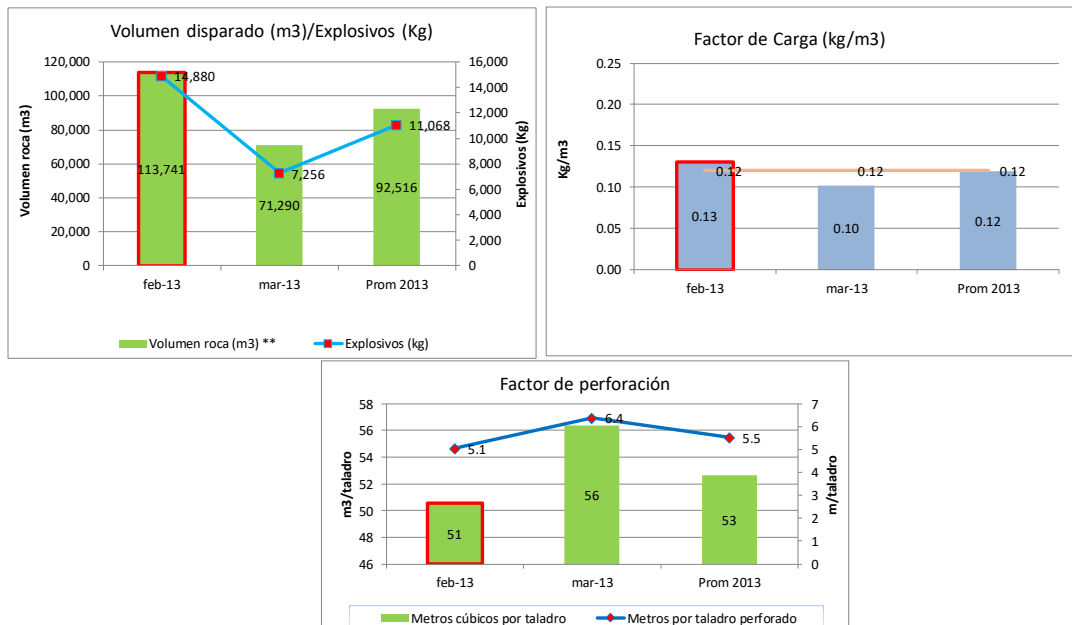
## TRAMO 2

**Tabla 4.19:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg **TRAMO 2**

Item	TRAMO2 D=2.5 pulg INDICADOR	Unid.	feb-13	mar-13	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	113,741	71,290	92,516	185,031
2	Explosivos (kg)	kg	14,880	7,256	11,068	22,136
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.13	0.10	0.12	0.12
4	Metros perforados *	m	11,374	8,071	9,722	19,445
5	Taladros perforados *	u	2,251	1,264	1,758	3,515
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	51	56	53	53
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.1	6.4	5.5	5.5
8	Burden promedio	m	2.9	2.8	2.8	
9	Espaciamiento proemedio	m	3.3	3.2	3.2	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.13:** Indicadores de perforación y voladura D=2.5 pulg **TRAMO 2**



*Fuente: Elaboración propia*

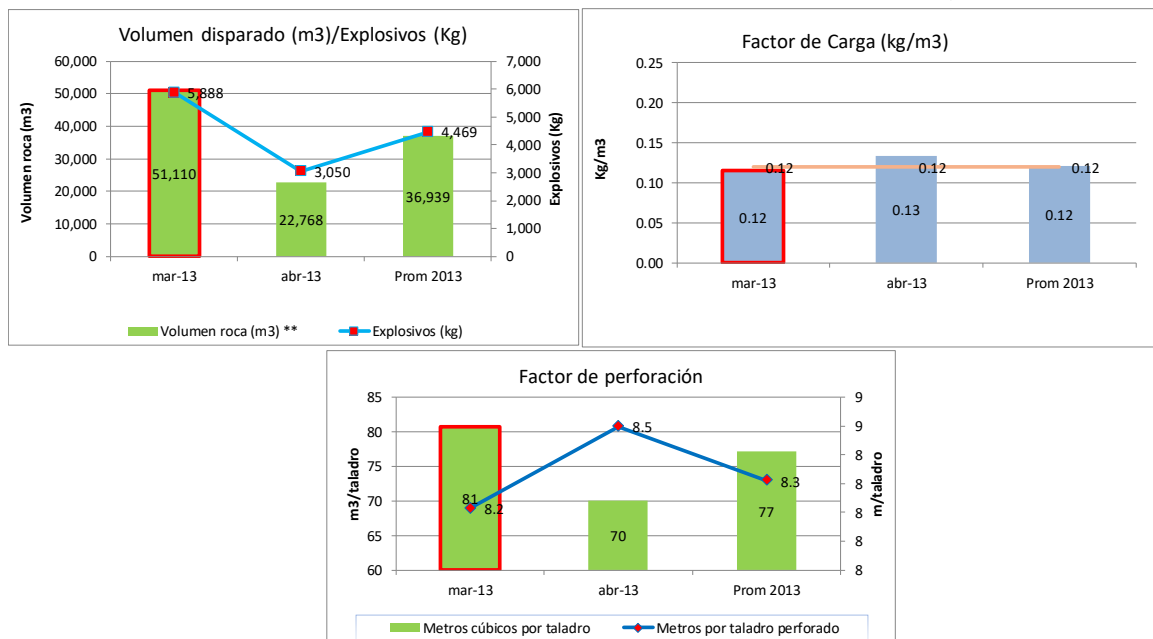


**Tabla 4.20:** Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg **TRAMO 2**

Item	TRAMO2 D=3 pulg INDICADOR	Unid.	mar-13	abr-13	Prom	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	51,110	22,768	36,939	73,878
2	Explosivos (kg)	kg	5,888	3,050	4,469	8,938
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.12	0.13	0.12	0.12
4	Metros perforados *	m	5,199	2,762	3,981	7,961
5	Taladros perforados *	u	633	325	479	958
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	81	70	77	77
7	Metros por taladro perforado	m/tal	8.2	8.5	8.3	8.3
8	Burden promedio	m	2.9	2.4	2.6	
9	Espaciamiento promedio	m	3.3	2.8	3.0	

*Fuente: Elaboración propia*

**Imagen 4.14:** Indicadores de perforación y voladura D=3.0 pulg **TRAMO 2**



*Fuente: Elaboración propia*



**Tabla 4.21:** Indicadores de perforación y voladura por diámetro **TRAMO 2**

Item	TRAMO2 DIAMETRO INDICADOR	Unid.	2.50	3.00	Prom 2013	Total
1	Volumen roca (m3) **	m3	185,031	73,878	129,455	258,909
2	Explosivos (kg)	kg	22,136	8,938	15,537	31,074
3	Factor Carga (kg/m3)	kg/m3	0.12	0.12	0.12	0.12
4	Metros perforados *	m	19,445	7,961	13,703	27,406
5	Taladros perforados *	u	3,515	958	2,237	4,473
6	Metros cúbicos por taladro	m3/tal	53	77	58	58
7	Metros por taladro perforado	m/tal	5.5	8.3	6.1	6.1
8	Burden promedio	m	2.8	2.6	2.7	
9	Espaciamiento promedio	m	3.2	3.0	3.1	

*Fuente: Elaboración propia*

## RESUMEN GLOBAL

**Tabla 4.22:** Indicadores de perforación y voladura por frentes de trabajo

Zona	Carga (kg)	Tala-dros	Metros perforados	Volumen (m3)	Factor Carga (kg/m3)
<b>Total ACP18</b>	88,615	6,864	51,128	575,592	0.15
<b>Total Cantera 21</b>	19,627	1,825	14,451	148,956	0.13
<b>Total Cantera 19</b>	79,053	5,612	41,131	483,662	0.16
<b>Total Cantera 20</b>	8,600	1,376	6,679	73,589	0.12
<b>Total Tramo 02</b>	8,938	958	7,961	73,878	0.12
<b>Total general</b>	204,832	16,635	121,351	1,355,678	0.15

*Fuente: Elaboración propia*

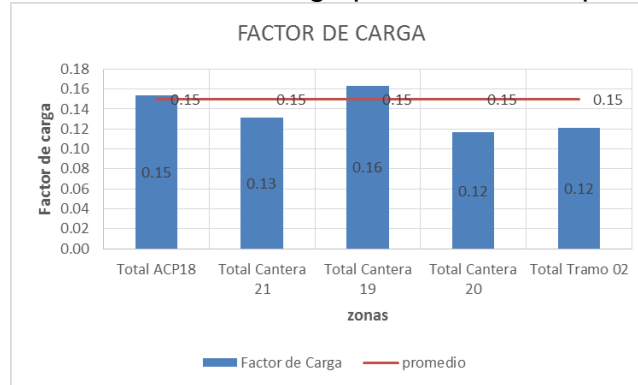
**Tabla 4.23:** Burden y Espaciamiento promedio por frentes de trabajo

Zona/Diametro	2.5		3.0		3.5	
	B(m)	S(m)	B(m)	S(m)	B(m)	S(m)
Total ACP18	2.7	3.0	3.0	3.2	3.5	3.6
Total Cantera 21			2.8	3.0		
Total Cantera 19	3.0	3.0	3.1	3.1	3.5	3.5
Total Cantera 20	2.7	2.8	2.8	3.0		
Total Tramo 02	2.8	3.2	2.6	3.0		
<b>Promedio general</b>	<b>2.79</b>	2.99	<b>2.89</b>	3.06	<b>3.48</b>	3.57

*Fuente: Elaboración propia*



Imagen 4.15: Factor de carga promedio anual por frentes.



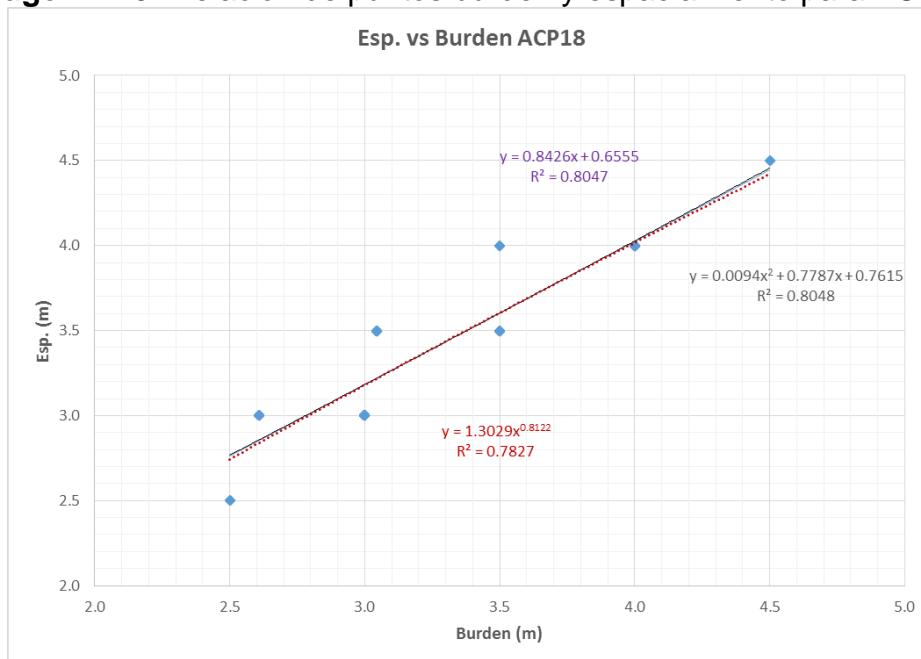
Fuente: Elaboración propia

Se muestra que el factor de carga por frente también tiene una variación pequeña, siendo el promedio de **0.15kg/m3**.

### ECUACION DE CORRELACION DE BURDEN Y ESPACIAMIENTO

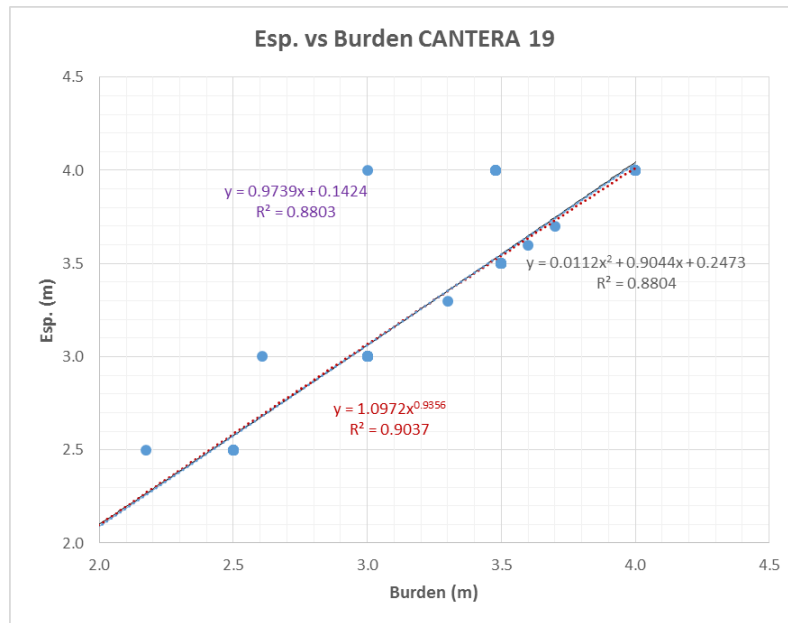
Con los datos mostrados anteriormente se correlacionaron los parámetros burden y espaciamento datos fundamentales para el diseño de la malla de perforación.

Imagen 4.16: Relación de puntos burden y espaciamento para ACP18



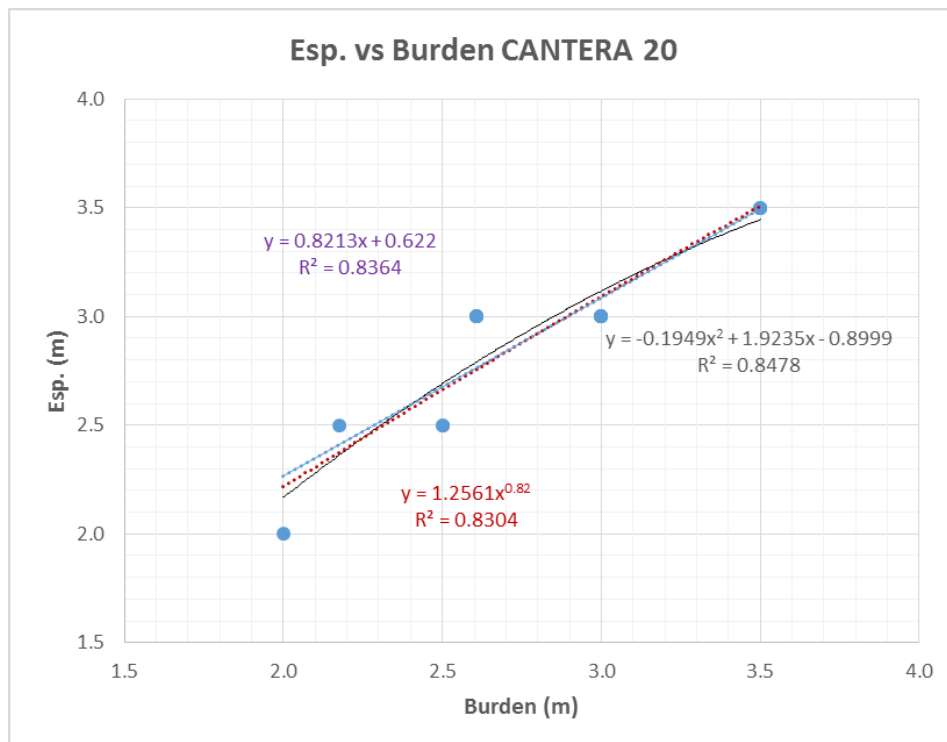
Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.17:** Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA19



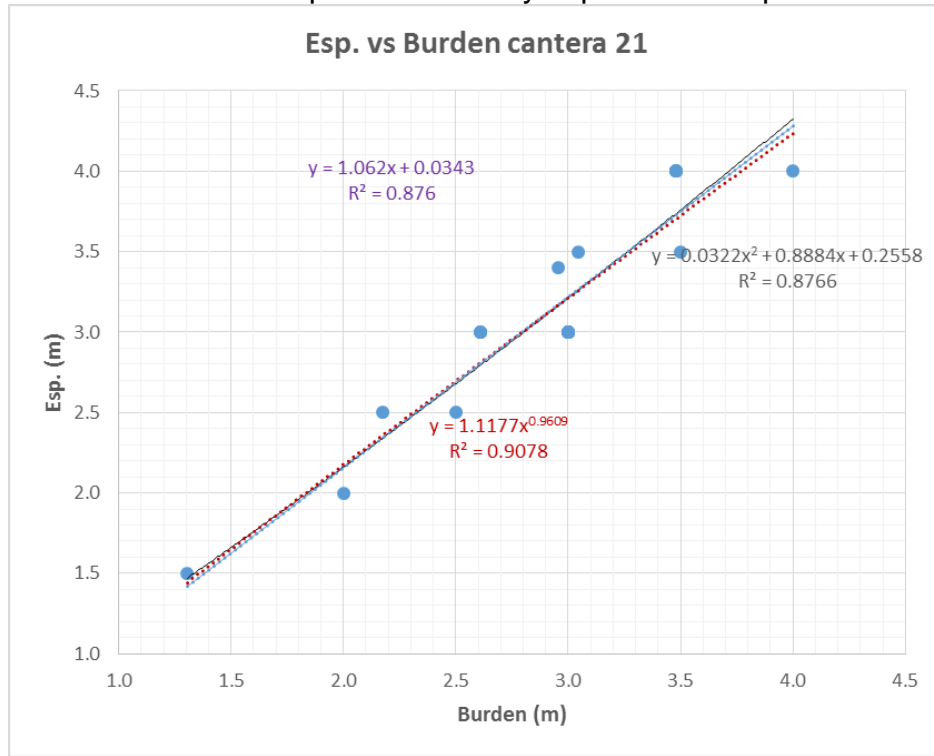
Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.18:** Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA20



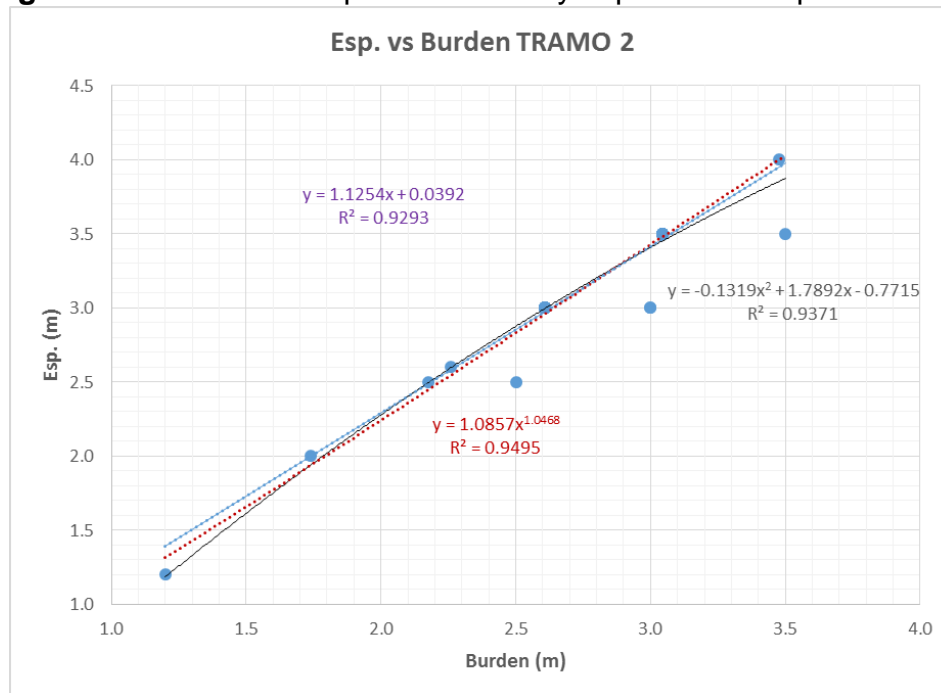
Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.19:** Relación de puntos burden y espaciamento para CANTERA21



Fuente: Elaboración propia

**Imagen 4.20:** Relación de puntos burden y espaciamento para TRAMO2



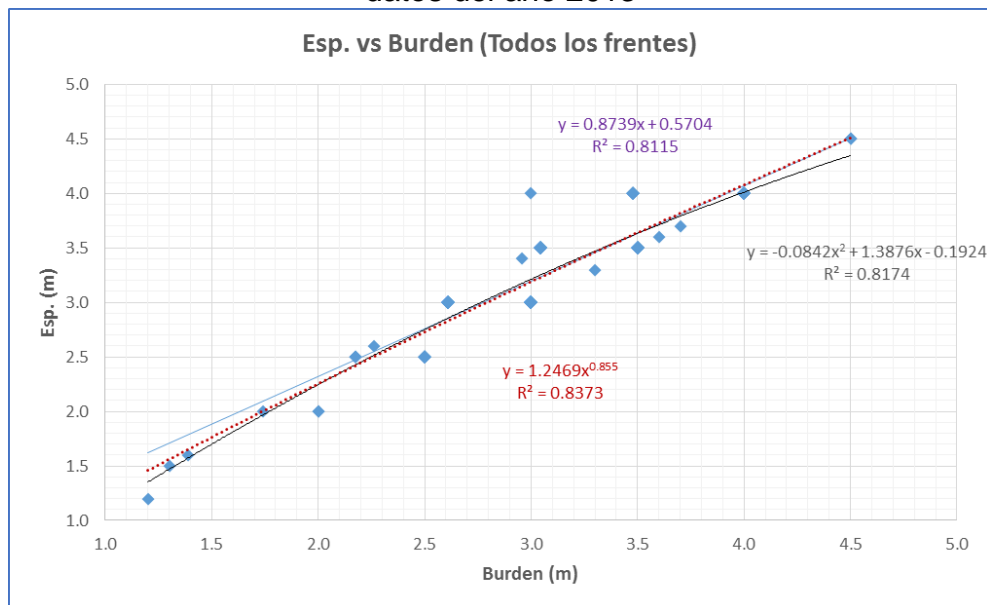
Fuente: Elaboración propia



Se observa en los diferentes gráficos las curvas de regresión que más se ajustan a los puntos y en la mayoría se acomoda con un mejor coeficiente de correlación de Pearson la ecuación potencial.

A continuación se muestra la curva de tendencia de todos los puntos en general, de todos los frentes de trabajo.

**Imagen 4.21:** Relación de puntos burden y espaciamiento para todos los frentes datos del año 2013



Fuente: Elaboración propia

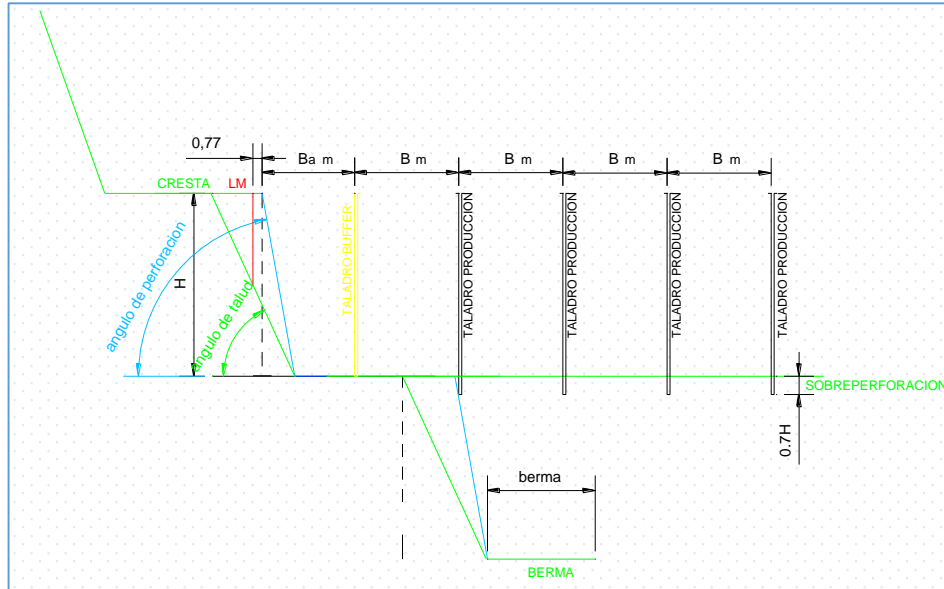
De ahí seleccionamos la ecuación potencial para correlacionar nuestros parámetros de Burden (B) contra Espaciamiento (S).

$$S = 1.2469 B^{0.855}$$

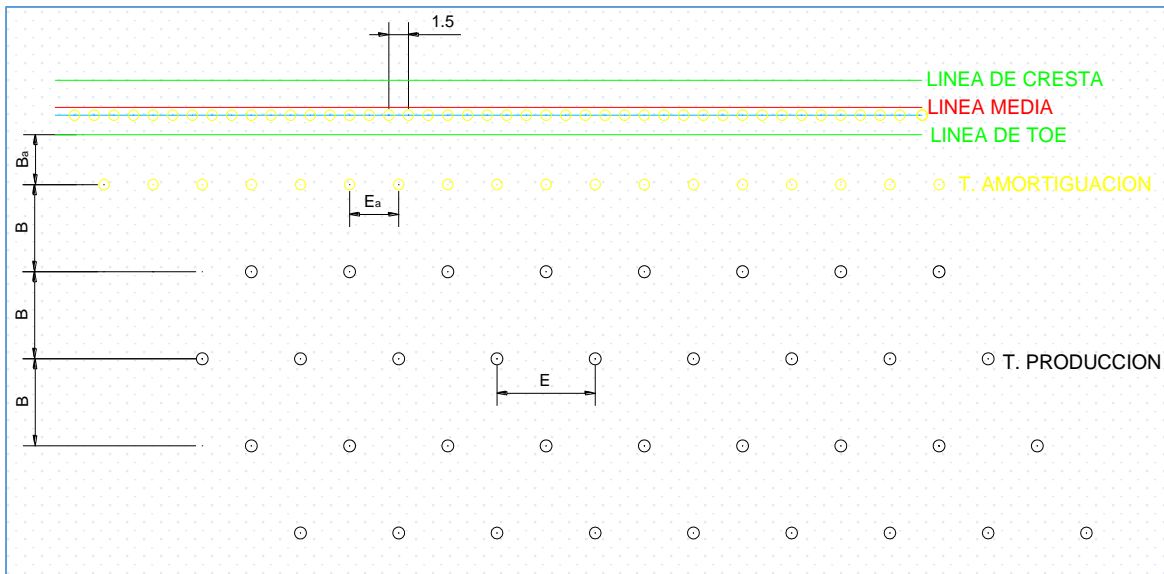
Donde B y S están en metros.



Imagen 4.22: vista en perfil y planta de un proyecto de voladura



Esquema del diseño de la perforación vista perfil



Esquema del diseño de perforación vista en planta  
 Fuente: Elaboración propia



**UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZAN  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA  
SECCION DE PREGRADO**



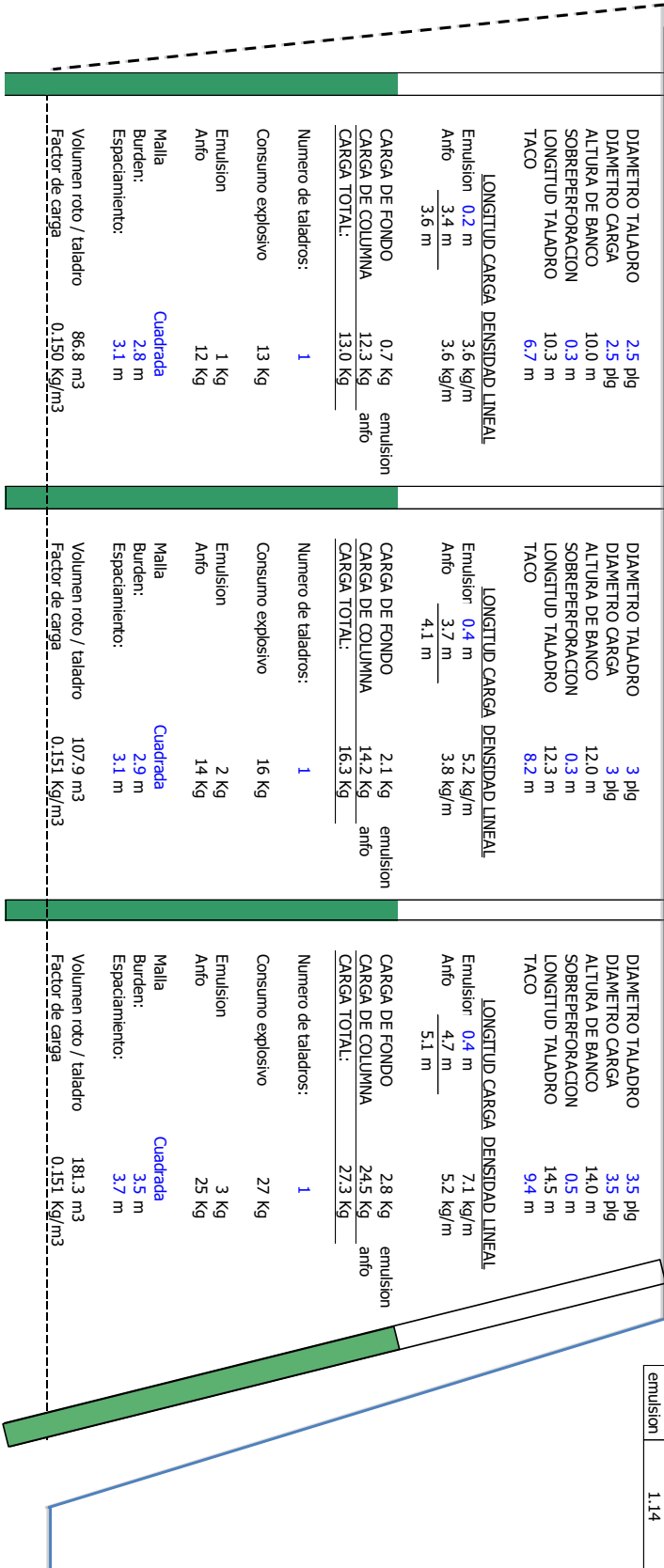
CHINILLA OPERATIONS  
DRILLING AND BLASTING

**DISEÑO DE PROYECTO DE VOLADURA**

LUGAR	BANCO	SUPERVISOR	Juan Lazarte	FECHA disparo	
NIVEL	PROYECTO	DISPARADOR	Heber Madueño	HORA disparo	

<b>Diseño = 2.5 pulg</b>		<b>Diseño = 3.0 pulg</b>		<b>diseño D = 3.5 pulg</b>	
--------------------------	--	--------------------------	--	----------------------------	--

Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	0.84
anfo	
emulsion	1.14

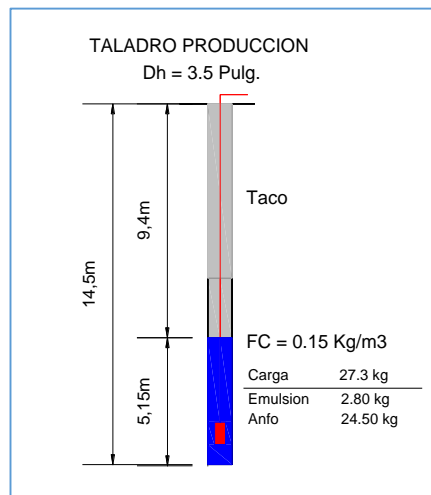
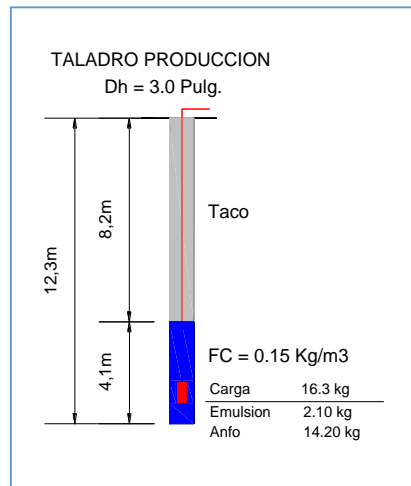
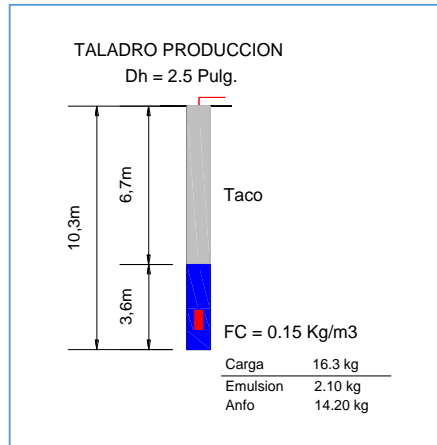


Zona/Diámetro	2.5		3.0		3.5	
	B(m)	S(m)	B(m)	S(m)	B(m)	S(m)
Total ACP#18	2.7	3.0	3.0	3.2	3.5	3.6
Total Carrera 21	3.0	3.0	2.8	3.0	3.5	3.6
Total Carrera 19	2.7	2.6	3.1	3.1	3.5	3.5
Total Carrera 20	2.7	2.6	2.8	3.0		
Total Carrera 22	2.7	2.6	2.8	3.0		
Total Carrera 23	2.7	2.6	2.8	3.0		
Promedio general	2.79	2.99	2.89	3.06	3.46	3.57

**S = 1.2469 B<sup>0.855</sup>**



Imagen 4.23: Diseño de taladros de producción para los diferentes diámetros



Fuente: Elaboración propia



### Calculo de tiempo de retardo de barreno a barreno

$$t_h = T_h \times S$$

th: Retardo barreno a barreno (ms)  
 Th: Constante de retardo barreno a barreno  
 S: Espaciamiento

**Tabla 4.24:** Constante de retardo barreno a barreno

ROCA	Constante Th (ms/m)
Arenas, margas y carbón	6.5
Algunas calizas y esquistos	5.5
Calizas compactas y mármoles, algunos granitos y basaltos, cuarcita y algunas gneis	4.5
Feldespato porfiricos, gneis y mica, magnetitas	3.5

### Calculo de tiempo de retardo entre filas

$$t_R = T_R \times B$$

tr: Retardo entre filas (ms)  
 Tr: Factor de tiempo entre filas  
 B: Burden, bordo o piedra.

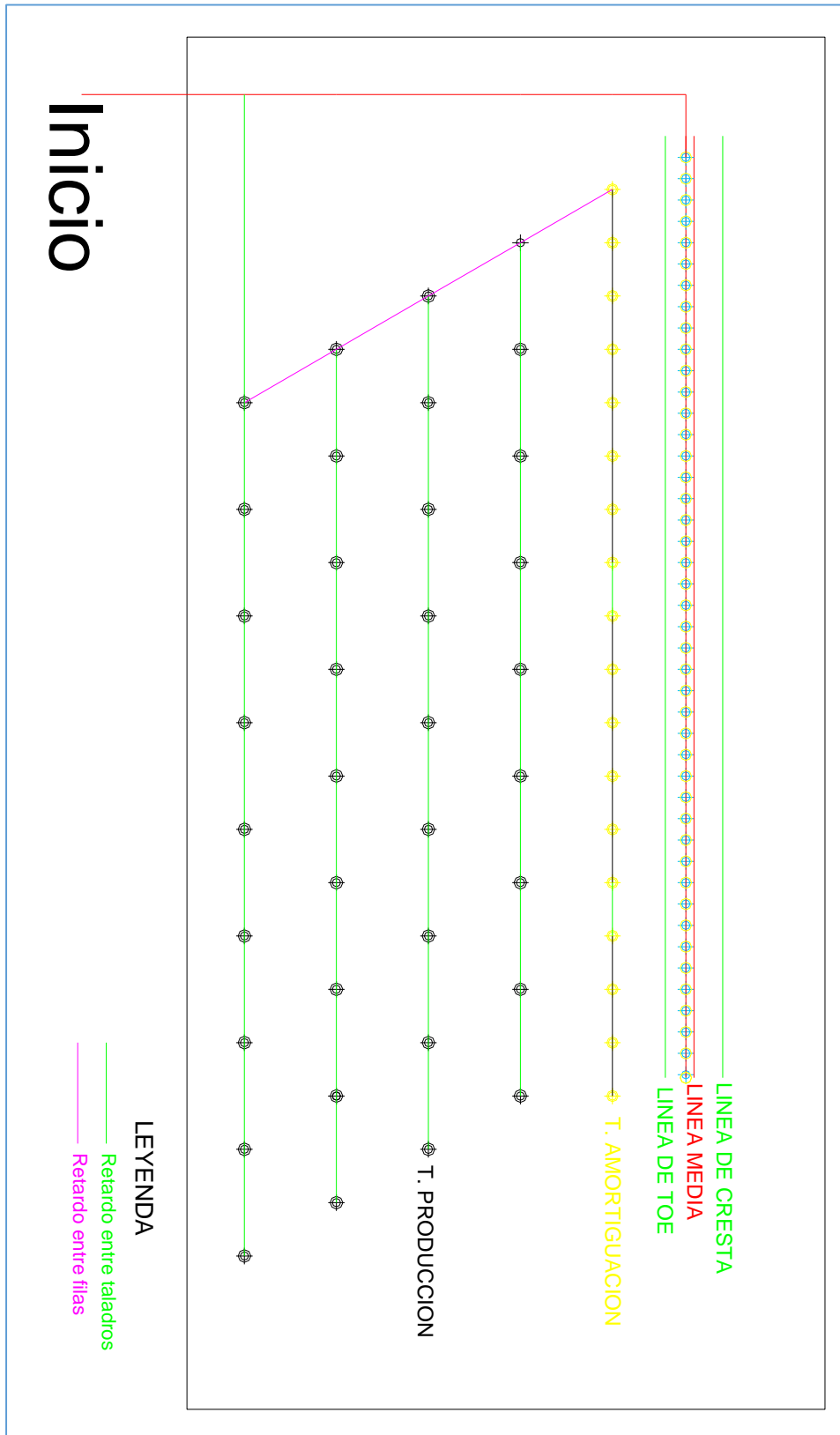
**Tabla 4.25:** Factor de tiempo entre filas

Constante Th (ms/m)	RESULTADO
6.5	Violencia, sobrepresión de aire excesiva, rompimiento trasero, etc
8.0	Pila de material alta cercana a la cara libre, sobrepresión y rompimientos moderados.
11.5	Altura de pila promedio, sobrepresión y rompimiento promedio.
16.5	Pila de material disperso con rompimiento trasero mínimo.

### Calculo de los tiempos de retardo entre taladros y filas

D=2.5 pulg		D=3.0 pulg		D=3.5 pulg	
<b>B</b>	2.8m	<b>B</b>	2.9m	<b>B</b>	3.5m
<b>S</b>	3.1m	<b>S</b>	3.1m	<b>S</b>	3.7m
<b>th</b>	14ms	<b>th</b>	14ms	<b>th</b>	17ms
<b>tr</b>	47ms	<b>tr</b>	48ms	<b>tr</b>	58ms

Imagen 4.24: distribución de retardos





## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- Las rocas calizas del proyecto Construcción de la central Hidroeléctrica Chaglla, tienen un buen resultado de voladura con un factor de carga promedio de  $FC=0.15 \text{ kg/m}^3$  (Kg de explosivo por  $\text{m}^3$  de roca disparada) siendo la ecuación encontrada entre burden (B) y espaciamiento (S) en metros,  $S = 1.2469 B^{0.855}$ , una ecuación potencial con un coeficiente de correlación de Pearson de  $R^2 = 0.8373$ , utilizable para voladuras de pequeño diámetro.
- Ningún modelo matemático existente hasta la fecha nos ofrece una medida aproximada del burden, siendo los cercanos los modelos de Ucar, Rustan y López Jimeno.



## RECOMENDACIONES

- En vista a los resultados obtenidos para realizar la primera aproximación del cálculo del burden en rocas de características similares o proyectos cercanos a este, se recomienda el uso del modelo matemático de Ucar, Rustan o López Jimeno para un primer diseño y posteriormente ajustarlo hasta llegar a un resultado óptimo, y el cálculo del espaciamiento se realizara con la ecuación encontrada  **$S = 1.2469 B^{0.855}$**  y la cantidad de carga explosiva por taladro con el **FC=0.15 kg/m<sup>3</sup>**.
- Es necesario la colocación de retardos en las filas y los troncales para la mejor distribución de energía para evitar las rocas volantes y menor vibración en los taludes, así como la salida correcta por la cara libre.
- Se recomienda realizar las perforaciones de pre corte completas ya que en muchos casos no se realizaron por el tema de producción.
- Se reconcomida a los futuros egresados profundizar más el tema sobre las voladuras de rocas ya que también es parte importante de la ingeniería civil, ya que esta actividad es muy aplicada a la construcción de diversas obras civiles.



## BIBLIOGRAFÍA

- **EXSA- CTVE “Centro Tecnológico de Voladura EXSA”.**
- **EXSA “MANUAL PRACTICO DE PERFORACION Y VOLADURA” 4.ta edición.**
- **Bruno Chaucayanqui Quisa.** Perforación y Voladura de Rocas. Arequipa – 2001.
- **Camac Torres, Alfredo.** Perforación y Voladura de Rocas. FIM/UNA. Perú.
- **López Jimeno: Manuel de Perforación y Voladura de rocas.** España -1998 Y 2003
- **Ing. Romulo Mucho “PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS, VOLADURA DE CONSTRUCCIÓN, CONTROL DE VIBRACIONES Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES EN OBRAS CIVILES”**
- **BERGER, Eduardo; SCHERPENISSE, Carlos: Tronadura Controlada y Evaluación del Daño en Minas de Cielo Abierto; Publicaciones Instituto de Ingenieros de Minas de Chile; Antofagasta; 1998.**
- **CAMERON K. McKenzie: Desempeño del Explosivo y Precorte; Universidad Nacional Santiago Antunez de Manolo; Huaraz 2006.**
- **CAMERON K. McKenzie: Tecnología de Voladura de Roca; Publicaciones Universidad Nacional de Ingeniería; Lima; 1998.**
- **DYNO NOBEL DEL PERÚ: Voladura de Precorte; Control Perimétrico: Productos Explosivos; 1996**





## ANEXOS

- PLANOS.