

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ROCA DURA
MEDIANTE EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA”.**

Realizado por:

Abdul Khalek M., Fadia.

Acosta C., Nomar A.

**Monografía de Grado presentada ante la Universidad de
Oriente como Requisito Parcial para optar al Título de:
INGENIERO CIVIL**

BARCELONA, DICIEMBRE DE 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ROCA DURA
MEDIANTE EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA”.**

Realizado Por:

Abdul Khalek M., Fadia.

Acosta C., Nomar A.

Revisado y Aprobado Por:

**Prof. Esteban Hidalgo.
Asesor Académico**

BARCELONA, DICIEMBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



“CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ROCA DURA
MEDIANTE EL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA”.

JURADO CALIFICADOR:

___Prof. Hidalgo Esteban.

Jurado Principal

___Prof. Torres Luisa.

Jurado Principal

___Prof. Montejo Enrique.

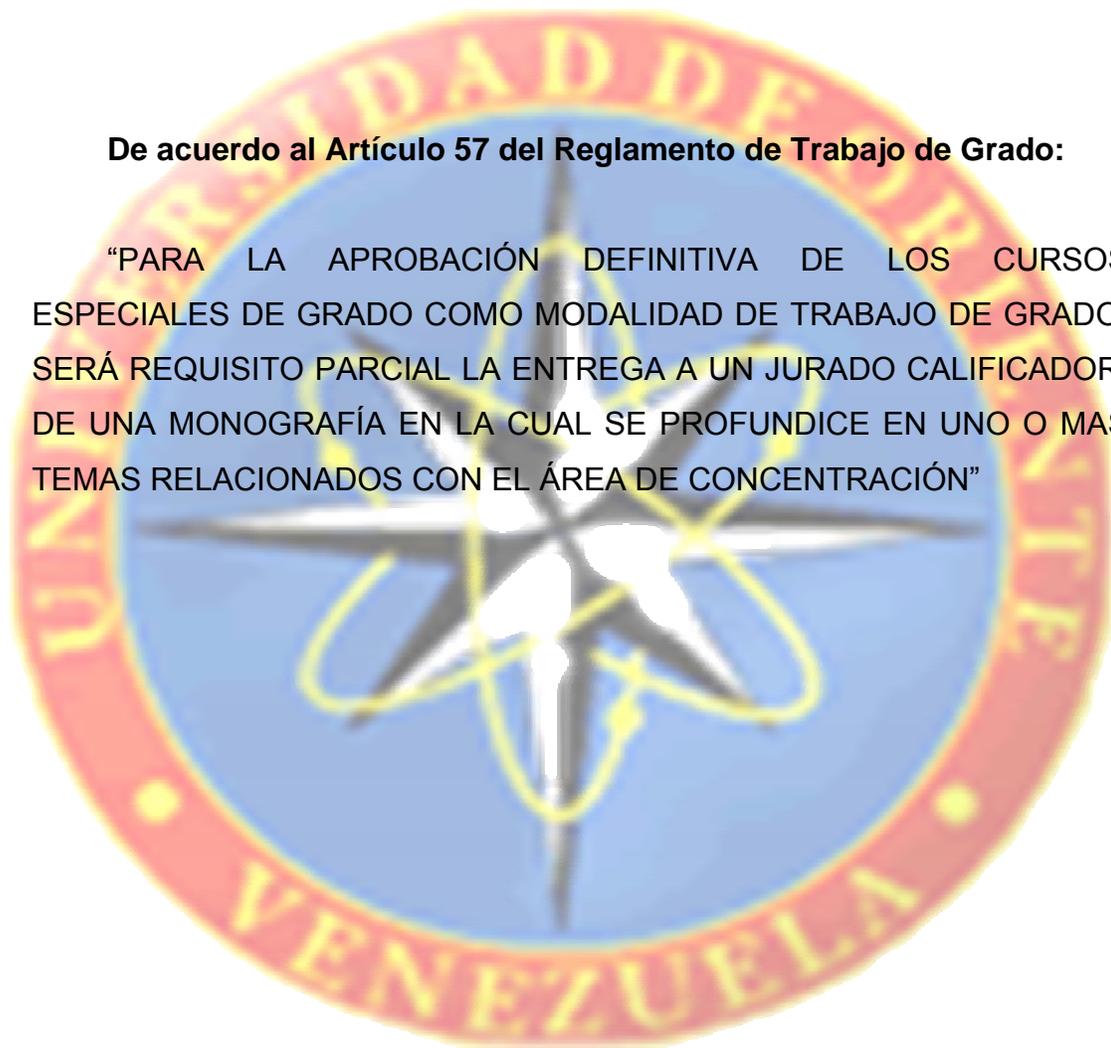
Jurado Principal

BARCELONA, DICIEMBRE DE 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 57 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“PARA LA APROBACIÓN DEFINITIVA DE LOS CURSOS ESPECIALES DE GRADO COMO MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO, SERÁ REQUISITO PARCIAL LA ENTREGA A UN JURADO CALIFICADOR, DE UNA MONOGRAFÍA EN LA CUAL SE PROFUNDICE EN UNO O MAS TEMAS RELACIONADOS CON EL ÁREA DE CONCENTRACIÓN”



DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía e incondicional amigo y compañero.

A mi padre Bassam, por ser un padre ejemplar, enseñarme que luchando se puede alcanzar todas las metas y mas allá de ellas, por ser el gran hombre que eres, por estar a mi lado incondicionalmente, y darme ese ánimo de seguir adelante, gracias por tu amor de padre.

A mi madre Sismae, por ser la gran mujer que eres, por ser una madre ejemplar, por ser la mejor madre del mundo, por estar a mi lado incondicionalmente, y darme ese ánimo de seguir adelante, gracias por tu amor de madre.

Son las dos personas que les debo todo, me formaron para estudiar y alcanzar mis metas, El empeño, la buena educación y la rectitud de ustedes dos me dieron la disciplina necesaria para lograr esto, ustedes son lo más importante de mi vida y por lo tanto les dedico este trabajo. Por ustedes he llegado hasta aquí.

A mis bellos hermanos Siham, Samar y Fady, por estar allí en las buenas y malas, los amo.

A mis tíos, primos y todos aquellos que de una u otra forma me apoyaron y me ayudaron en esto, gracias están en mi corazón.

Fadia., Abdul Khalek M.

En primer lugar a Dios y a la Virgen del Valle, por guiarme el camino a seguir.

A mi padre Norge, por enseñarme que no hay obstáculo imposible de superar, e impulsarme a lograr mis metas. Por ser un gran padre y estar a mi lado en las buenas y en las malas, gracias por todo.

A mi madre Marisla, por ser una gran madre, por motivarme a continuar adelante y a lograr todo aquello que me propongo, por guiar mis pasos y por que la quiero mucho, gracias por estar hay siempre.

Mis padres son las personas a las cuales les debo la vida y quienes me han impulsado a superar los todos obstáculos que se presentan, a enseñarme que la familia esta primero, por ellos les dedico este trabajo el cual también es de ustedes. Gracias a ustedes he llegado hasta aquí.

A mi abuelo Adalberto, por ser un ejemplo a seguir y por que mas que mi abuelo es otro padre para mí. Gracias por todo.

A mis hermanos María y Rubén, por estar a mi lado en todo momento. Y a mis primos José y Jessica, los cuales son como dos hermanos mas.

A mi abuela Esmerides y mi tía Adalmeris, que siempre han cuidado de mi y siempre han estado hay cuando he necesitado de ellas.

Nomar A., Acosta C.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme el entendimiento, la fortaleza y el valor necesario para poder estar donde estoy hoy.

A mis tíos, Yousef, Yasser, Atenso, Plinio, Ruth por estar allí cuando los necesite.

A mi novio Javier Gómez, por ayudarme en todo lo que estuvo a su alcance, por estar allí cuando más lo necesite, por enseñarme a confiar y creer en mi misma, por su amor y dedicación. Muchas gracias.

A la familia Gómez Parra por recibirme en su hogar como una hija más, se le quiere mucho.

A mi compañero de áreas Nomar Acosta, por su paciencia y ayuda.

A mis compañeros y amigos que estuvieron junto a mí durante toda o parte de mi carrera: **Jesús Vásquez, Danellys Atay, Melissa Fermín, Juan Rodríguez, Carlos Ramos, Sandra Jiménez, Humberto Ortiz, Delimar Hernández, Gianna Alvino** sin ustedes esto no sería igual, de una u otra forma, me ayudaron y mucho. Gracias por brindarme su sincera amistad.

Al profesor Esteban Hidalgo, por su dedicación, profesionalismo, apoyo y paciencia. Muchas gracias por su gran ayuda.

Fadia., Abdul Khalek M.

A Dios y a la Virgen del Valle por ser mis guías y mis protectores.

A la familia Marciano, (Jose y Edi) que me recibieron en su hogar como otro hijo más, y junto a ellos viví mis primeros días fuera de mi casa, cuando comencé el reto de estudiar en la universidad.

A toda mi familia en general, por apoyarme e incentivarme a lograr mis metas. Muchas gracias.

A mi novia Nora, por tener esa palabra de aliento cuando la necesitaba, gracias.

A Mi compañera de las áreas Fadia, por tener paciencia, dedicación y por su colaboración.

A mis compañeros y amigos, a los que quiero y aprecio, con los que disfrute lo dulce de nuestros triunfos y lo amargo de las derrotas. **Ángel Manzano, Maria Almeida, Eduardo Barreto, Martha Aponte, María Longar.**

Al profesor Esteban Hidalgo, por su orientación, profesionalismo y paciencia, muchas gracias por todo.

Nomar A., Acosta C.

RESUMEN

Como medio de estudio e investigación en la elaboración del presente trabajo, utilizamos diversas obras, páginas Web y estudios en tan importante materia, como lo es la excavación de túneles por el método de perforación y voladura, llegando a la conclusión que éste método es el más utilizado y más efectivo para la construcción de túneles, especialmente cuando se van a construir en terrenos rocosos, y éste resulta el más apropiado cuando el tipo de roca existente en el espacio seleccionado presenta una estructura abrasiva y se halla en estado masivo. Este método ofrece la posibilidad cierta de que las rocas sean fracturadas en su totalidad, sin embargo se debe de actuar con sumo cuidado al escoger el tipo de explosivo idóneo, evaluando la densidad y velocidad de la detonación que tenga cada explosivo; las características de la roca y las condiciones que presenta el suelo sobre el cual se va a trabajar, y ello en función de que se ofrecen en el mercado explosivos de diferente poder de detonación. Se pudo conocer que el proceso de voladura a ejecutar consta con la aprobación y supervisión de la empresa CAVIM. Analizamos estudios relacionados con la construcción de túneles mediante perforación y voladura logrando un cúmulo de conocimientos, entre los cuales destacan que en el empleo de ese método se debe constar con un sistema de avance seguro, un buen diseño de la sección del frente de ataque del túnel que visualice una buena ubicación del cuele para poder contar con una cavidad inicial y del contracuele que garanticen las siguientes explosiones en un tiempo suficiente para no detener la excavación y lograr el objetivo sin mayores contratiempos. Este aspecto lo abordamos a lo largo del trabajo que hemos realizado, así como los demás aspectos tratados o considerados en el mismo.

ÍNDICE

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vii
AGRADECIMIENTOS	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN	ix
ÍNDICE	x
TABLAS Y FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvii
CAPITULO I	19
1.1. El problema.	19
1.2. Objetivo del estudio	21
1.2.1. Objetivo General.....	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	22
2.1. Definiciones	22
2.1.1. Túnel.	22
2.1.2. Excavación.	22
2.1.3. Perforación.	22
2.1.4. Barreno.....	22
2.1.5. Taladros.	23
2.1.6. Perforadora.....	23

2.1.7. Voladura.....	23
2.1.8. Explosivos.....	23
2.1.9. Cara libre.....	23
2.1.10. Detonador.....	23
2.1.11. Taqueador.....	24
2.1.12. Roca.....	24
2.2. Factores Relacionados con la Función de Cada Túnel	24
2.2.1 Localización.....	24
2.2.2. Terreno.....	24
2.2.3. Dimensiones y Geometría.....	25
2.2.4. Forma Estructural.....	25
2.2.5. Métodos de Construcción.....	25
2.2.6. Equipamiento.....	25
2.3. Funciones de un Túnel según su Requerimiento.....	25
2.3.1. Transporte.....	26
2.3.2. Almacenamiento y Plantas.....	26
2.3.3. Protección De Las Personas.....	26
2.4. Tipos de rocas.....	26
2.4.1. Rocas Ígneas.....	26
2.4.2. Rocas Sedimentarias	27
2.4.3. Rocas Metamórficas.....	27
2.5. Excavación en roca.....	27
2.5.1. Roca Dura.....	28

2.5.2. Roca Muy Dura.....	28
2.6. Métodos De Excavación de Túneles en Roca.....	28
2.6.1. Excavaciones Mecánicas Con Máquina.....	29
2.6.1.1. Rozadora.....	29
2.6.2. Excavación Mecánica Con Máquinas Integrales No Presurizadas.	29
2.6.2.1. Tuneladora, Topo O TBM.....	29
2.6.3. Excavación Mecánica Con Máquinas Integrales Presurizadas. .	30
2.6.4. Excavación por Perforación y Voladura.....	30
2.7. Ciclo de trabajo del sistema de excavación de túneles mediante el método de perforación y voladura.	30
2.7.1. Replanteo En El Frente Del Esquema De Perforación.	31
2.7.2. Perforación de los taladros.....	33
2.7.2.1. Técnicas Para Efectuar Barrenos Perimetrales.....	33
2.7.2.2. Número De Taladros.	34
2.7.2.3. Longitud De Taladros.	35
2.7.2.4. Accesorios De Perforación.	35
2.7.2.5 Tipos De Perforación.....	37
2.8. Zonas de la voladura de un túnel.	43
2.8.1. Cuele.....	43
2.8.1.1 Tipos De Cuele.....	43
2.8.2. Destroza.....	47
2.8.3. Zapateras.....	47

2.8.4. Contorno.....	48
2.8.5. Contracuele.	48
2.9. Carga de los Taladros con Explosivo y Tendido del Sistema de Iniciación.	48
2.9.1. Explosivos.	49
2.9.1.1. Tipos De Explosivos.	49
2.9.1.2. Características Generales De Los Explosivos.....	53
2.9.1.3. Almacenamiento De Explosivos.	55
2.9.1.4. Accesorio De Inicialización De Los Explosivos.....	60
2.9.2. Cantidad De Carga.....	61
Tabla 3.- Cantidad de Carga por Metro Cúbico Según el Tipo de	62
2.9.9.1. Distribución De La Carga.	63
2.10. Ventilación.....	73
2.11. Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales. ...	74
2.11.1. Retirada del escombros.	74
2.11.1.1. Palas Cargadoras De Perfil Bajo.	75
2.11.1.2. Pala Cargadora Más Camión Dumper.....	75
2.11.1.3. Vagonetas Sobre Vía.	76
2.11.1.4. Saneamiento Del Frente, Bóvedas y Hastiales.	76
2.12. Hormigón proyectado.	76
2.13. Entibación.....	77
2.13.1 Forma de actuar de una entibación.	77

2.13.1.1. Rígida: Cuando es prácticamente indeformable, es decir, no permite desplazamiento de la roca.....	78
2.13.1.2. Flexible: Cuando permite deformaciones controlada de la roca.	78
2.14. Ventajas de construir un túnel con el método de perforación y voladura.....	78
2.15. Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (Cavim).	79
2.16. Comentarios finales.....	81
Bibliografía	82
Metadatos para trabajos de grado, tesis y ascenso:	83

TABLAS Y FIGURAS

Figuras

Figura 1.- Métodos de Excavación de Túneles en Roca.	28
Figura 2.- Esquema de Perforación Típico.	31
Figura 3.- Hoja Resumen con los Datos de una Voladura en un Frente del Túnel.	32
Figura 4.- Barrenos y Cabezas de Perforación.	36
Figura 5.- Perforación Manual.	38
Figura 6.- Jack Leg.	39
Figura 7.- Jack Hammer.	39
Figura 8.- Stopep.	40
Figura 9.- Perforadora Hidráulica.	41
Figura 10.- Perforadora Hidráulica Jumbo.	42
Figura 11.- Cueles en V y en Abanico.	44
Figura 12.- Cuele Paralelo.	44
Figura 13.- Cuele de Cuatro Secciones.	45
Figura 14.- Relación Diámetro de Barreno y Piedra.	46
Figura 15.- Zona del Esquema de Perforación.	48
Figura 16.- Clasificación de los Explosivos.	49
Figura 17.- Vistas de un Polvorín.	56
Figura 18.- Clasificación de los Polvorines.	57
Figura 19.- Polvorín Superficial.	57
Figura 20.- Polvorín Semienterrado.	58

Figura 21.- Diagrama de Perforación.	65
Figura 22.- Vista de Frente.....	67
Figura 23.-. Detalle de la Cuña.....	68
Figura 24.- Diagrama de Disparo Jumbo.....	70
Figura 25.- Diagrama de Disparos Jumbo.....	71
Figura 26.- Diversos Sistemas de Ventilación.	74

Tablas

Tabla 1.- Relación Sección Burden.	45
Tabla 2.- Corriente de Disparo Mínima y de Diseño.....	61
Tabla 3.- Cantidad de Carga por Metro Cúbico Según el Tipo de Roca.	62

INTRODUCCIÓN

Cuando uno en lo personal o por preocupación científica, escoge como tarea específica una averiguación o ésta le es asignada, tiene, obligatoriamente, que despejar algunas interrogantes, especialmente cuando tiene interés o es de importancia para nuestra formación profesional, intelectual o científica. Aquí, en el caso concreto que nos ocupa, nos preguntamos: ¿Por qué el tema? Porque este, sin lugar a dudas, genera una situación que, si bien, tiene su complejidad y plantea, a quien aspira convertirse en un profesional de la ingeniería, todo un mundo de posibilidades que se ofrecen frente a la realidad o ante la situación que se nos puede plantear en relación con un proyecto vial de cualquier magnitud que, en una u otra forma, contribuirá al desarrollo articulado y armónico de la nación.

La construcción de túneles en materia vial, requiere el uso de maquinarias especiales o el método de excavación por voladuras, que ha sido el escogido por nosotros. El túnel es una obra subterránea destinada a unir dos puntos, entre los cuales se pueden presentar diversos obstáculos que debemos afrontar. El primero de ellos lo representa el tipo de terreno a excavar, que puede ser blando (suelo) o rocoso (duro o semiduro), y dependiendo de sus características se escoge el método a utilizar para su excavación, ya sea con maquinas o explosivos. Los explosivos se clasifican: en lentos (la pólvora), violentos (la dinamita), de seguridad (dinamitas especiales para minas de carbón) y mechas y detonadores (corrientes y eléctricos). Estos explosivos, en general, ofrecen estabilidad química, sensibilidad, velocidad de detonación, densidad de encartuchado, gravedad específica, resistencia al agua, emanaciones o humos e inflamabilidad. La sección del túnel donde se va a realizar la voladura presenta el siguiente

ciclo: replanteo en el frente del esquema de perforación, perforación de los taladros de la cara libre, carga de los taladros con explosivos, voladura y ventilación, retirada de escombros y saneo del frente. En el sistema de excavación mecánica se emplean rozadoras, tuneladoras (topos o TBM), martillo hidráulico y jumbos.

En el desarrollo articulado de las naciones la vialidad, que tiene un apoyo importante en los túneles, que abordaremos en profundidad en el desarrollo de este tema, surge como un factor fundamental para la consolidación de ese proceso. Por eso la importancia que le atribuimos al tema que abordaremos con una gran disposición, conscientes de que el mismo contribuirá a nuestra formación profesional y científica.

En el presente trabajo se realizara un estudio referente a la construcción de túneles en roca dura mediante el sistema de perforación y voladura en túneles viales, y determinar la mejor aplicación de los explosivos, para a su vez obtener el mejor rendimiento de los mismos. Estableciendo un análisis que permita precisar con exactitud cuál es la viabilidad que ofrecen los explosivos para la construcción de túneles destinados al tránsito vehicular.

CAPITULO I

1.1. El problema.

El crecimiento urbanístico y poblacional de las ciudades han ido creando nuevos y urgentes retos a los planificadores, a quienes dirigen los destinos de los conglomerados humanos que conforman el planeta, porque ese desarrollo avanza aceleradamente y en una forma sostenida. El aprovechamiento racional de los espacios físicos, se torna cada vez más importante y exigente. La implantación de políticas adecuadas en los urbanísimos, los servicios públicos y la vialidad, está dirigida fundamentalmente, a acercar al ser humano, al habitante y al fruto de su creación en todos los aspectos de su quehacer.

Se impone como meta y objetivo básico, la defensa de la calidad de vida de los conglomerados que van a ser favorecidos, tratando en lo posible, que el impacto negativo sea leve, disminuyendo o evitando al máximo la afectación del medio ambiente a través de la planificación de eficientes vías de comunicación de túneles, una muy interesante opción, que afortunadamente se está imponiendo con una gran fuerza en el campo de la administración pública como en el medio privado.

Barton y Bieniawshi (Citado por Cáceres, 2006) señalaron que la implantación de los túneles como una importante solución, ha sido un tema de mucha relevancia en la era de los ferrocarriles, en la minería así como en el transporte tanto público como privado, recobrando su relevancia en las modernas carreteras, en zonas de cordillera, zonas inaccesibles, cruce por debajo de ríos, e incluso creando túneles falsos en las ciudades para aliviar el tráfico vehicular.

No solo se debe tener en cuenta, el rápido crecimiento de la densidad poblacional, sino también crecimientos urbanísticos, desarrollos industriales, de igual manera el incremento de transporte carretero de mercancía, entre otros. Por estas razones existe la necesidad de crear nuevos accesos viales entre países, estados y pueblos como son los túneles carreteros.

En 2007 Martínez señaló que los túneles carreteros son estructuras construidas por el hombre, tanto en zonas urbanas, como montañosas, con el propósito de que el tránsito de vehículos pueda superar con mayor facilidad zonas o tramos de vialidad de naturaleza geográfica conflictivas, teniendo un ahorro considerable en los tiempos de viajes, a su vez dejando de emitir una cantidad considerable de emisiones tóxicas. Son obras de uso público que normalmente disponen de un importante equipamiento complementario destinado a garantizar la seguridad de los usuarios.

Romana (1993) según la clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles, expresa: Los métodos de excavación de túneles dependen, en primer lugar, y fundamentalmente, del tipo de terreno que se va a excavar. De esta forma se debe hablar por separado de la excavación de túneles en suelos o terrenos blandos y túneles en rocas.

En la actualidad el pensum de la carrera no contempla una asignatura específica, que haga referencia a proyectos de construcción de túneles, sin embargo los ingenieros civiles ocasionalmente en el ejercicio de su profesión pueden ejecutar proyectos viales, que contemplen la construcción de túneles mediante el método de perforación y voladura, por lo tanto, esta monografía servirá como punto de referencia para otros profesionales de la ingeniería civil.

1.2. Objetivo del estudio

1.2.1. Objetivo General.

Analizar el método de perforación y voladura en la construcción de túneles viales.

1.2.2. Objetivos específicos.

1. Describir el ciclo de trabajo en la construcción de túneles mediante perforación y voladura.
2. Explicar un diagrama de perforación en el frente de un túnel vial.
3. Informar acerca de los equipos utilizados en la perforación de túneles viales.
4. Especificar los tipos de explosivos utilizados en la voladura.
5. Hallar la mejor aplicación del uso de los explosivos para obtener su mejor rendimiento en la construcción de túneles viales.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Definiciones

En todo proyecto de investigación se deben manejar definiciones y ciertos conceptos relacionados con dicho trabajo, a tal efecto mencionamos a continuación los que han sido considerados para una mejor comprensión y entendimiento del mismo.

2.1.1. Túnel.

Un túnel es una obra subterránea de carácter lineal, cuyo objeto es la comunicación de dos puntos, para realizar el transporte de personas, materiales, entre otras cosas. Normalmente es artificial.

2.1.2. Excavación.

Es el proceso en el cual, se hace huecos en un terreno de forma horizontal o vertical, a mano o con máquinas, requiere de técnicas, productos, equipos especiales y de análisis geológicos, geotécnicos e hidráulicos.

2.1.3. Perforación.

Para efectuar la voladura de rocas es necesario efectuar el confinamiento del material explosivo, es necesario perforar la roca, a este tipo de horadación de agujero se le conoce como perforación, y a los agujeros se les conoce comúnmente con el nombre de taladros.

2.1.4. Barreno.

Es un dispositivo o herramienta utilizada para desplazar sólidos o líquidos, El material es desplazado a lo largo de su eje de rotación, el barreno es una parte integral de una perforadora, es la mecha del taladro.

2.1.5. Taladros.

Se llaman taladros a los agujeros cilíndricos que se realizan en un frente de perforación, mediante la utilización de un barreno u otro equipo.

2.1.6. Perforadora.

Es el equipo de trabajo utilizado para la perforación de los alojamientos de las barrenas para las voladuras.

2.1.7. Voladura.

Se denomina voladura a la acción de fracturar la roca mediante el empleo de explosivos, sin embargo, también se emplea ese término como sinónimo en las demoliciones con explosivos y en general, a todas aquellas acciones en las que intervenga explosivo, también es llamada como tronadura.

2.1.8. Explosivos.

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de componentes que, cuando es calentado, impactado, sometido a fricción o a choque, produce una rápida reacción exotérmica liberando una gran cantidad de gas y produciendo altas temperaturas y presiones en un breve instante de tiempo.

2.1.9. Cara libre.

Es el lugar hacia el cual se desplaza el material cuando es disparado, por la acción del explosivo.

2.1.10. Detonador.

Los detonadores son también conocidos como dispositivos de iniciación, que contienen una pequeña carga detonante, usados para hacer detonar o iniciar un explosivo.

2.1.11. Taqueador.

Para taquear se debe de hacer uso de varillas de madera o de material que no produzcan chipas, y sólo con el propósito de empujar los explosivos hasta el fondo del barreno, con el cuidado de no dañar la mecha de seguridad, cordón detonante o alambres en el momento de taquear.

2.1.12. Roca.

Una roca es una mezcla de minerales enlazados por la presión que algún tiempo tuvo mediante las fuerzas del movimiento de la corteza terrestre. Tal presión unió diversos materiales para juntar un monolito, un conglomerado, o tan solo un granito de ese material. En geología se llama roca a cualquier material de origen natural y orgánico constituido por varios minerales y que su composición química no es definida.

2.2. Factores Relacionados con la Función de Cada Túnel

Estos factores se deberán tener en cuenta totalmente en la planeación y diseño del proyecto. Generalmente, es poco satisfactorio e ineficaz agregar algo al proyecto o modificarlo en una etapa posterior, a menos que se haya previsto en la planeación original.

2.2.1 Localización.

Puede ser a través de una montaña o una colina, estar sumergido o ser urbano.

2.2.2. Terreno.

Puede ser desde un limo blando hasta una roca dura uniforme, lo que abarca un campo muy amplio en lo que respecta al comportamiento de una excavación, el agua puede representar una parte muy importante. Cualquier

selección que se haga del terreno implica cambios en la geometría, la forma estructural y el método de construcción.

2.2.3. Dimensiones y Geometría.

Son las del túnel terminado: ancho, altura y longitud, junto con los niveles, pendientes y curvas.

2.2.4. Forma Estructural.

Podrá ser un círculo, herradura, rectángulo o cualquier otra forma que incorpore hierro colado, concreto, albañilería, concreto lanzado, etc., para soportar la carga impuesta. La naturaleza del terreno y el método de construcción influirán de un modo decisivo sobre la forma estructural.

2.2.5. Métodos de Construcción.

Varían desde la perforación por barrenos y explosivos o por una máquina excavadora de túneles, con o sin un escudo, hasta el corte y relleno en diversas secuencias, e incluyendo los túneles prefabricados sumergidos. La selección del método está limitada no solo por las condiciones del terreno, sino también por los recursos disponibles en su más amplio sentido.

2.2.6. Equipamiento.

El túnel terminado incluye las calzadas o las vías de ferrocarril, iluminación, ventilación, acabados decorativos y funcionales, y sistemas de control.

2.3. Funciones de un Túnel según su Requerimiento.

Según Megan, T. y Bartlett J. (1988). Las principales funciones que tienen los túneles, dejando a un lado los túneles de minas y los hechos por los zapadores militares, abarcan:

2.3.1. Transporte.

- De personas y Mercancías (pasos a desnivel para peatones y ciclistas, ferrocarriles y subterráneos, carreteras).
- De agua (canales, abastecimientos, urbanos, irrigación, energía hidroeléctrica y agua de enfriamiento).
- Sistemas de Alcantarillado.
- Servicios por Cables y Tuberías.

2.3.2. Almacenamiento y Plantas.

- Estacionamiento para carros.
- Almacenamiento del petróleo en depósitos subterráneos.
- Estaciones Subterráneas de Energía.
- Instalaciones para usos militares.
- Eliminación de los residuos radioactivos.

2.3.3. Protección De Las Personas.

- Refugios.
- Puestos de Control.

2.4. Tipos de rocas.

El tipo de roca abarca una amplia variedad de factores que van desde la formación básica hasta las propiedades específicas como textura, composición mineralógica, química, edad, origen, anisotropía, grado de alteración y dureza. De acuerdo a dichos factores se dividen en:

2.4.1. Rocas Ígneas.

Son las que provienen del Magma Ígneo, que es una masa de roca fundida, formada de silicatos, gases y vapor de agua, y que se ubica en la zona más externa del manto y en la zona inferior de la corteza terrestre.

2.4.2. Rocas Sedimentarias

Proviene de rocas desintegradas arrastradas por ríos y depositadas en capas que son sometidas durante un considerable período de tiempo a elevadas temperaturas y presiones. Ejemplos: Areniscas, conglomerados, Brechas.

2.4.3. Rocas Metamórficas.

Proviene de un largo proceso de reclasificación de otras rocas, que se produce a altas temperaturas (entre 100 y 600 grados C) y altas presiones (miles de atmósferas), con un aumento de densidad. Las rocas metamórficas son rocas ígneas o sedimentarias que se han transformado mineralógicamente y estructuralmente por un proceso que se llama Metamorfismo.

2.5. Excavación en roca.

En 2009 Percy señaló que los medios necesarios para realizar una excavación varían con la naturaleza del terreno, que desde este punto de vista, se pueden clasificar en:

- Terrenos sueltos.
- Terrenos flojos.
- Terrenos duros.
- Terrenos de tránsito.
- Roca blanda.
- Roca dura.
- Roca muy dura.

En la excavación de túneles por el método de perforación y voladura, solo será aplicable para las siguientes rocas:

2.5.1. Roca Dura.

Rocas calizas duras o silíceas, rocas ígneas y metamórficas y masas de rocas poco alteradas, cuarcita y minerales de baja densidad sólo pueden ser excavadas por máquinas especiales para cada caso, se usan explosivos de media potencia.

2.5.2. Roca Muy Dura.

Rocas ígneas no alteradas como granito, diorita, diabasa, rocas metamórficas duras, minerales densos. Se necesitan máquinas especialmente diseñadas y el uso de explosivos de alta potencia.

2.6. Métodos De Excavación de Túneles en Roca.

Los métodos de excavación de túneles en roca son básicamente dos: el de perforación y voladura, mediante la utilización de explosivos y la excavación mecánica, mediante tuneladora o topos (TBM), especialmente diseñados para tal fin y las máquinas de ataque puntual, rozadoras o martillos de impacto.



Figura 1.- Métodos de Excavación de Túneles en Roca.
Fuente: Elaborado por los autores.

2.6.1. Excavaciones Mecánicas Con Máquina.

Se consideran en este grupo las excavaciones que se avanzan con maquinas rozadoras; con excavadoras, generalmente hidráulica, brazo con martillo pesado o con cuchara, sea de tipo frontal o retro; con tractores y cargadoras (destrozadoras) e, incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.

2.6.1.1. Rozadora.

Máquina de ataque puntual; consta de un brazo desplazable que bate la sección de excavación y que lleva en su extremo un cabezal provisto de las herramientas de corte "picas". El par de rotación del cabezal, el empuje de los cilindros hidráulicos del brazo y las fuerzas de reacción de la máquina, se concentra en las puntas de las picas iniciadoras del rozado. El material rocoso excavado se desprende en forma de lascas o chips de roca.

2.6.2. Excavación Mecánica Con Máquinas Integrales No Presurizadas.

Esta excavación se realiza a sección completa empleando las máquinas integrales de primera generación o no presurizadas. Otro rasgo común es que, en general, la sección de excavación es circular. Por ejemplo la Tuneladora (TBM):

2.6.2.1. Tuneladora, Topo O TBM.

Se produce la excavación de la roca a plena sección, generalmente de forma circular. La energía mecánica es generada mediante motores eléctricos y transmitida a la cabeza giratoria de la máquina en forma de un par de rotación, a través de circuitos hidráulicos. Este par de rotación, junto con el empuje proporcionado por unos cilindros hidráulicos a la cabeza de la máquina contra el frente de excavación, aportan la energía mecánica a las

herramientas de corte "discos", que la transmiten a la roca a través de la superficie de contacto de los mismos. El nivel de la energía liberada es capaz de producir, en primer lugar la penetración o indentación de los cortadores de disco y, en segundo lugar, el quebrantamiento por tracción y cizallamiento de la roca entre las series de cortadores concéntricos dispuestos en la cabeza de la máquina.

2.6.3. Excavación Mecánica Con Máquinas Integrales Presurizadas.

La baja competencia del terreno suele asociarse a casos de alta inestabilidad y presencia de niveles freáticos a cota superior a la del túnel la primera solución aplicada a los escudos mecanizados abiertos para trabajar en estas condiciones fue la presurización total del túnel.

2.6.4. Excavación por Perforación y Voladura.

Durante muchos años ha sido el método más empleado para excavar túneles en roca de dureza media o alta, hasta el punto de que se conoció también como Método Convencional de Excavación de Avance de Túneles. La excavación se hace en base a explosivos, su uso adecuado, en cuanto a calidad, cantidad y manejo es muy importante para el éxito de la tronadura y seguridad del personal, generalmente se usa dinamita.

2.7. Ciclo de trabajo del sistema de excavación de túneles mediante el método de perforación y voladura.

Como ya hemos señalado anteriormente, la excavación mediante perforación y voladura es el sistema más utilizado para la excavación de túneles en roca. Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de este sistema son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de perforación.
- Perforación de los taladros.
- Carga de los taladros con explosivo.
- Voladura y ventilación.
- Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.
- Hormigón proyectado y entibación.

2.7.1. Replanteo En El Frente Del Esquema De Perforación.

El esquema de perforación es la disposición en el frente del túnel de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno.

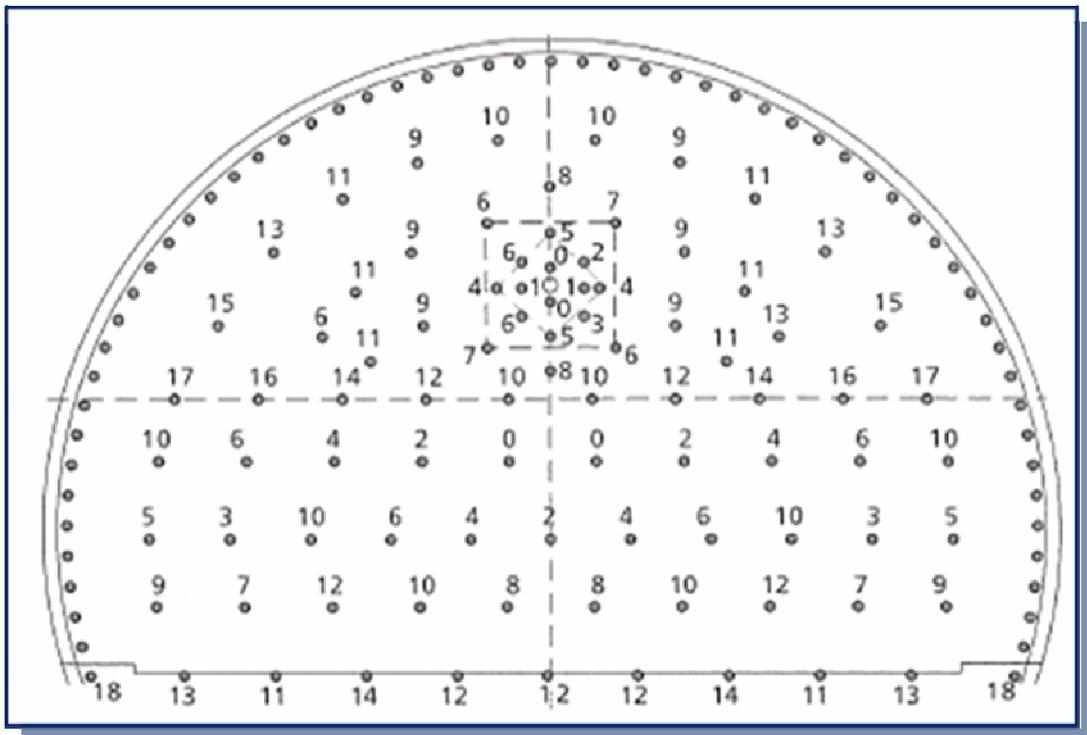


Figura 2.- Esquema de Perforación Típico.
Fuente: www.danotario.com/tuneles/voladura1.JPG

Aguilera (2009) señalo que el esquema de perforación se diseña al principio de la obra en base a la sección requerida y a una serie de reglas empíricas recogidas en los manuales sobre explosivos. Posteriormente, a lo largo de la excavación del túnel, se irá ajustando en función de los resultados obtenidos en cada voladura. En la figura 2 se observa una hoja resumen con los datos de una voladura en un frente del túnel.

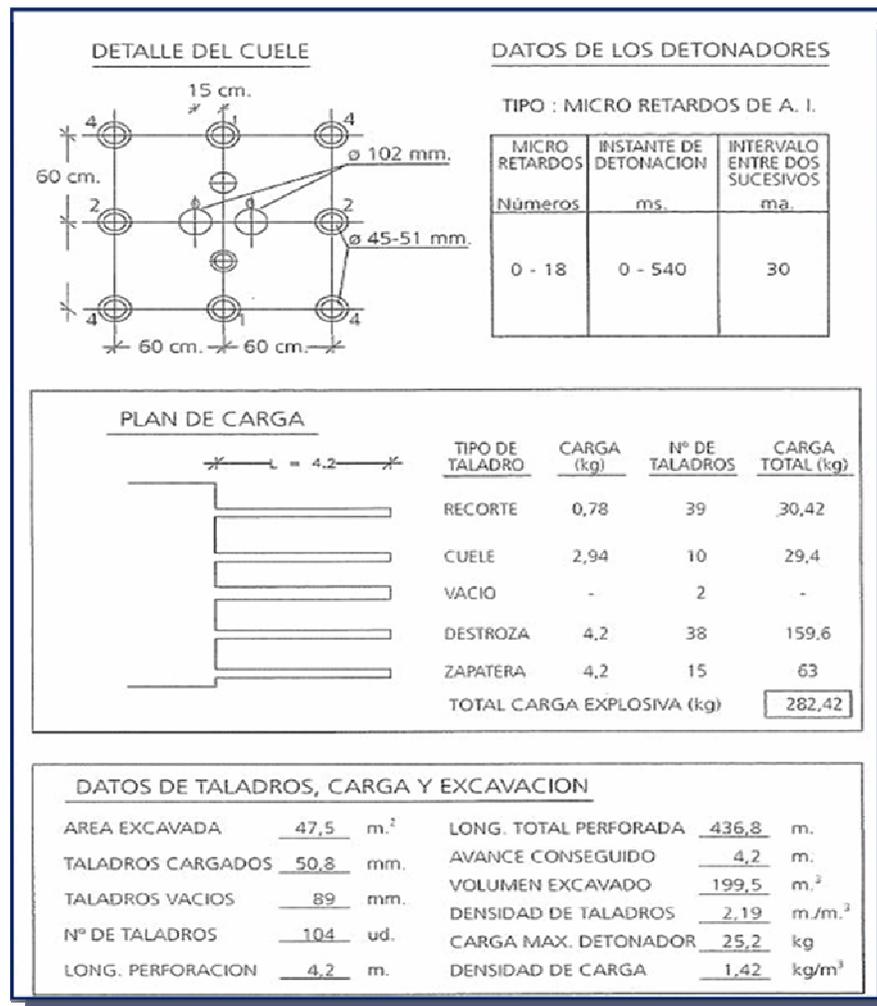


Figura 3.- Hoja Resumen con los Datos de una Voladura en un Frente del Túnel.

Fuente: http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06_met.pdf

Los esquemas indicados se refieren al avance o primera fase constructiva del túnel. Para las siguientes fases (destroza), existe la posibilidad de perforar el frente, con taladros horizontales, o en banco y con taladros verticales. Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas.

2.7.2. Perforación de los taladros.

La perforación se hace con el objetivo de arrancar o volar la máxima cantidad de roca o mineral situando el explosivo en el lugar apropiado (en este caso el taladro), a fin de lograr el objetivo con el mínimo de explosivos que se pueda. En otras palabras, la perforación se hace con el objeto de volar cierta porción de roca o mineral, para lo cual analizamos primero la roca y luego perforamos una serie de taladros, de modo que nos permita usar relativamente poco explosivo para poder volar un gran volumen.

Antes de comenzar con la perforación de los taladros se debe de definir y tener en cuenta lo siguiente:

2.7.2.1. Técnicas Para Efectuar Barrenos Perimetrales.

El 2009 Aguilera señaló que las técnicas para efectuar barrenos perimetrales se dividen en:

➤ **El Recorte.**

Consiste en perforar un número importante de taladros paralelos al eje del túnel en el contorno, a la distancia conveniente (entre 45 cm. y 100 cm.) y con una concentración de explosivo pequeña o incluso nula. En la secuencia de encendido son los últimos barrenos en detonar. La técnica del recorte es

la más ampliamente empleada.

➤ **El Precorte.**

Consiste en perforar un mayor número de taladros perimetrales y paralelos entre sí unas distancias entre 25 cm. y 50 cm., con una concentración de carga explosiva entre 0,1 y 0,3 kg/m. Esta técnica exige una perforación muy precisa que asegure un buen paralelismo y una homogénea separación entre los taladros. La carga explosiva, además de una adecuada concentración, debe distribuirse uniformemente a lo largo del barreno. En la secuencia de encendido, son los primeros en detonar, con lo que se crea una fisura perimetral que aísla y protege la roca de las vibraciones del resto de la voladura. Esta técnica del precorte, por su esmerada ejecución y costo elevado, es de uso poco frecuente en túneles, excepto en casos muy especiales.

2.7.2.2. Número De Taladros.

El número de taladros requerido para una voladura subterránea depende del tipo de roca a volar, del grado de confinamiento del frente, del grado de fragmentación que se desea obtener y del diámetro de los barrenos de perforación disponibles y también dependen de la sección del túnel; factores que individualmente pueden obligar a reducir o ampliar la malla de perforación y por consiguiente aumentar o disminuir el número de taladros calculados teóricamente. Influyen también la clase de explosivo y el método de iniciación a emplear.

Se puede calcular el número de taladros en forma aproximada mediante la siguiente fórmula empírica:

$$N^{\circ} \text{ taladros} = 10 * \sqrt{A * H}$$

Donde:

A: ancho de túnel.

H: altura del túnel.

2.7.2.3. Longitud De Taladros.

Será determinada en parte por el ancho útil de la sección, el método de corte de arranque escogido y por las características del equipo de perforación. Con corte quemado puede perforarse hasta 2 y 3 m de profundidad, mientras que con corte en “V” sólo se llega de 1 a 2 m de túneles de pequeña sección.

Para calcular la longitud de los taladros de corte en V, cuña o pirámide se puede emplear la siguiente relación:

Donde:

$$\text{Longitud de los taladros} = 0.5\sqrt{(S)}$$

S: es la dimensión de la sección del túnel en m².

L: longitud de los taladros expresada en m.

Luego de definir que técnica vamos a utilizar para perforar barrenos, el número de taladros a perforar y las longitudes de los mismos procedemos a perforar teniendo en cuenta, las divisiones del frente de un túnel, los accesorios de perforación y las distintas maquinarias de perforación, que se describen a continuación:

2.7.2.4. Accesorios De Perforación.

Los accesorios de perforación comúnmente usados son las varillas o barrenos y las cabezas de perforación. Además se emplean manguitos y otros adaptadores para el ensamblaje de las piezas. Los barrenos de perforación son simplemente barras de acero con un conducto interior para el paso del agua de refrigeración y extracción del material triturado, poseen unas roscas en los extremos donde se acoplan las bocas de perforación, las

cuales son herramientas de cortes, que generalmente son de metal endurecido (carburo de tungsteno), dispuesto en formas diversas: en cruz, en X o botones (ver figura 4). Los diámetros habituales están comprendidos entre 45 y 102 milímetros.



Figura 4.- Barrenos y Cabezas de Perforación.

Fuente: <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P47330.jpg>.

➤ **Barrenos y Cabezas de Perforación.**

La elección de un tipo de barreno, así como de sus diámetros, depende del tipo de maquinaria de perforación a utilizar, de las características de la roca y del diámetro de los cartuchos del explosivo a introducir. Generalmente las bocas de botones son las que proporcionan un mayor rendimiento, al golpear la roca de forma más homogénea y ser más fácil la evacuación del detritus de roca. Para tal fin se pueden disponer varias entradas de agua frontales y también laterales.

Para la elección del material de perforación y sus accesorios se recomiendan el uso de los manuales especializados facilitados por los fabricantes.

2.7.2.5 Tipos De Perforación.

➤ Perforación Manual.

Se realiza mediante el empleo de un barreno usado con la finalidad de facilitar su extracción de la roca y rotación del barreno es sostenido por el ayudante, mientras que el otro golpea con una comba, luego se hace girar un cierto ángulo para proseguir con el proceso de perforación. En la actualidad este método a quedado fuera de uso, por su bajo rendimiento, solo es usado en la minería artesanal para la extracción de minerales como el oro.

✓ Martillos manuales.

Los martillos manuales de aire comprimido funcionan a percusión y rotación, es decir, la barrena golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro. El detritus es arrastrado hasta el exterior del taladro mediante agua, que tiene también la finalidad de refrigerar la barrena. Los martillos manuales son actualmente de uso infrecuente, sólo se usan, obviamente, en túneles muy pequeños o de forma accidental, pues tienen rendimientos muy inferiores a los jumbos y requieren mucha mano de obra.

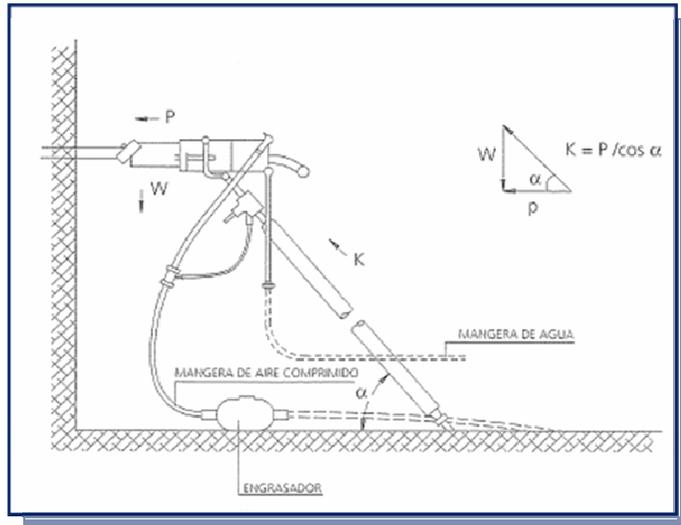


Figura 5.- Perforación Manual.

Fuente: http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06_met.pdf

➤ **Perforación Neumática.**

Se realiza mediante el empleo de una perforadora convencional; usando como energía el aire comprimido, para realizar huecos de diámetro pequeño con los barrenos integrales que poseen una punta de bisel (cincel) o cruz, los largos de las barras de los barrenos son de 0.80m, 1.60m, 2.40m, 3.20m son hechos de acero de alta resistencia; la punta del mismo se encarga de triturar la roca al interior del taladro. En cada golpe que la perforadora da al barreno y mediante el giro automático hace que la roca sea rota en un círculo que corresponde a su diámetro; produciéndose así un taladro.

✓ **Jack leg.**

Perforadora con barra de avance que puede ser usada para realizar taladros horizontales e inclinados, se usa mayormente para la construcción de galerías, subniveles, Rampas; utiliza una barra de avance para sostener la perforadora y proporcionar comodidad de manipulación al perforista.



Figura 6.- Jack Leg.

Fuente: <http://www.flickr.com/photos/afdn/2423121635/>

✓ **Jack hammer.**

Perforadoras usadas para la construcción de piques, realizando la perforación vertical o inclinada hacia abajo; el avance se da mediante el peso propio de la perforadora.

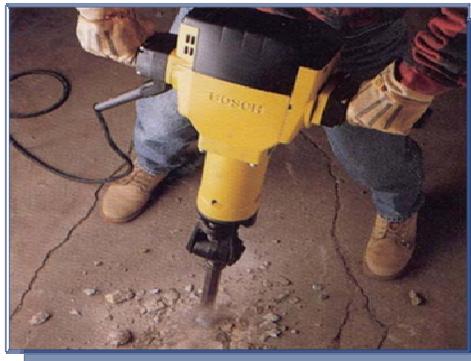


Figura 7.- Jack Hammer.

Fuente: <http://gtdevelopers.org/contens/images/Image/gtds/jackhammer.jpg>

✓ **Stopep.**

Perforadora que se emplea para la construcción de chimeneas y tajeado en labores de explotación (perforación vertical hacia arriba). Está constituido por un equipo perforador adosado a la barra de avance que hace una unidad sólida y compacta.

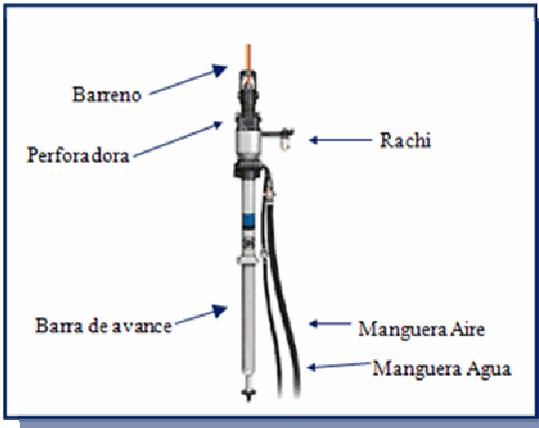


Figura 8.- Stopep.

Fuente: http://geco.mineroartesanal.com/tikidownload_wiki_attachment.php?attId=1

➤ **Perforación Eléctrica.**

Se realiza empleando energía eléctrica, que un generador lo provee y para ello se emplea una perforadora con un barreno helicoidal, que puede realizar taladros de hasta 90 cm de longitud, siendo el problema principal el sostenimiento de la perforadora para mantenerla fija en la posición de la perforación.

➤ **Perforación Hidráulica.**

Se realiza mediante el empleo de equipos altamente sofisticados, robotizados, de gran capacidad de avance y performance. Utiliza la energía hidráulica para la transmisión, control de fuerzas y movimientos en la perforación. Además, cuenta con un tablero de control computarizado, equipado con un software de perforación donde se grafica el trazo de perforación requerido. La gran ventaja de estos equipos es su gran precisión y paralelismo en la perforación. Por su gran rendimiento, es requerido por la gran minería.



Figura 9.- Perforadora Hidráulica.

Fuente:

<http://www.productosindustrialesam.com/image/Perforadora%20AM.jpg>

✓ **Jumbo.**

La maquina habitual de perforación es el jumbo. Consta de una carrocería automóvil dotada de dos o tres brazos articulados, según los modelos. En cada brazo puede montarse un martillo de perforación (perforadora) o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. El funcionamiento de los jumbos es eléctrico cuando están estacionados en situación de trabajo y pueden disponer también de un motor Diesel para el desplazamiento. Los martillos funcionan a rotopercusión, es decir, la barrena gira continuamente ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro.

Los jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar el esquema de perforación y perforar todos los taladros automáticamente.

En este caso un único maquinista puede perforar un esquema de perforación completo en unas pocas horas.

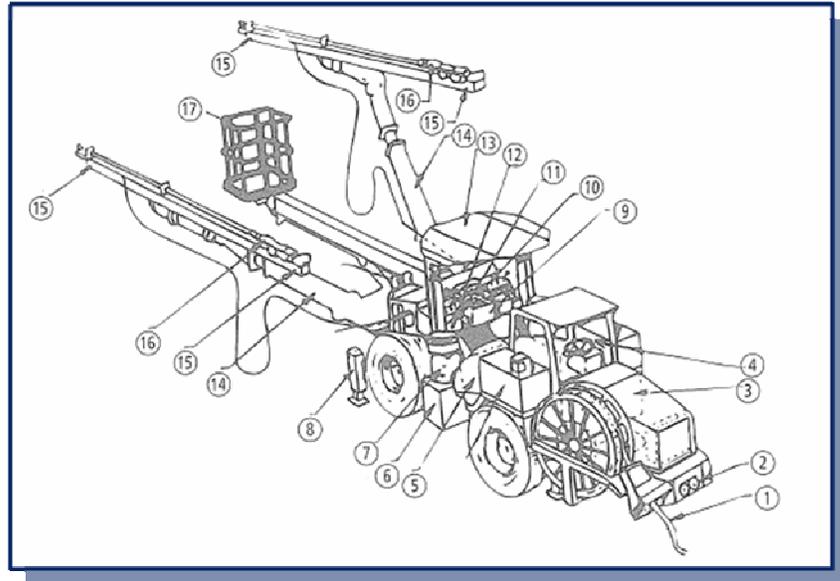


Figura 10.- Perforadora Hidráulica Jumbo.

Fuente: http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/06_met.pdf

Descripción, Perforadora hidráulica jumbo:

- (1) Cable de alimentación eléctrica (380V a 550V).
- (2) Sistema de iluminación.
- (3) Motor Diesel para desplazamiento por el túnel.
- (4) Puesto de conducción para el desplazamiento.
- (5) Tanque principal de fluido hidráulico.
- (6) Bomba hidráulica.
- (7) Motor eléctrico para la perforación
- (8) Gatos para estacionamiento de la máquina.
- (9), (10), (11) y (12): Puesto de mando para la perforación.
- (13) Techo de protección.
- (14) Brazo hidráulico.

(15) Deslizadera del martillo hidráulico.

(16) Martillo hidráulico.

(17) Cesta o plataforma de trabajo.

2.8. Zonas de la voladura de un túnel.

Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas. Estas zonas son:

- Cuele.
- Contracuele.
- Destroza.
- Zapateras.
- Contorno.

2.8.1. Cuele.

El cuele es la fase de la voladura que se dispara en primer lugar. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que pueda escapar la roca, con lo cual se posibilita y facilita su arranque.

2.8.1.1 Tipos De Cuele.

- **Los cueles en V y en abanico.**

Estos facilitan la salida de la roca hacia el exterior, pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo con respecto al eje del túnel, por lo que su correcta perforación tiene una mayor dificultad y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance.

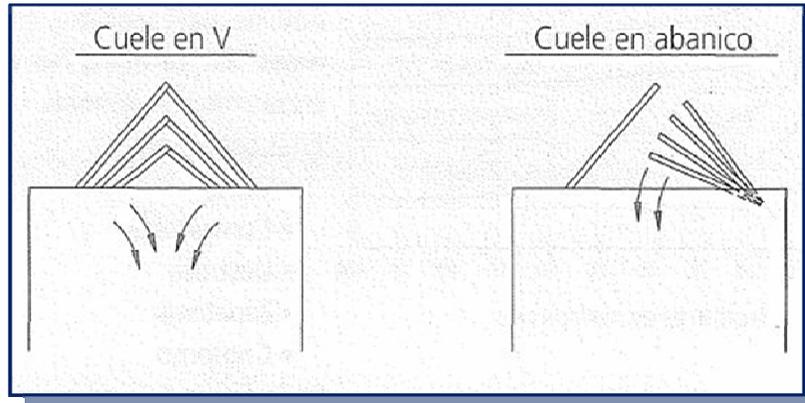


Figura 11.- Cueles en V y en Abanico.
 Fuente: <http://www.danotario.com/tuneles/voladura.php>

➤ **Cuele paralelo.**

Actualmente, es el tipo de cuele que se utiliza con más frecuencia en la excavación de túneles y galerías, con independencia de las dimensiones de éstas. Consiste en un taladro vacío (barreno de expansión), sin explosivos, de mayor diámetro que el resto (75 a 102 mm) y, a su alrededor, tres o cuatro secciones de taladros cargados que explotan sucesivamente siguiendo una secuencia preestablecida. La misión del barreno de expansión es la de ofrecer una superficie libre que evite el confinamiento de la roca de modo que facilite su arranque. En ocasiones puede sustituirse por dos taladros vacíos de diámetro menor (2 x 75 mm).

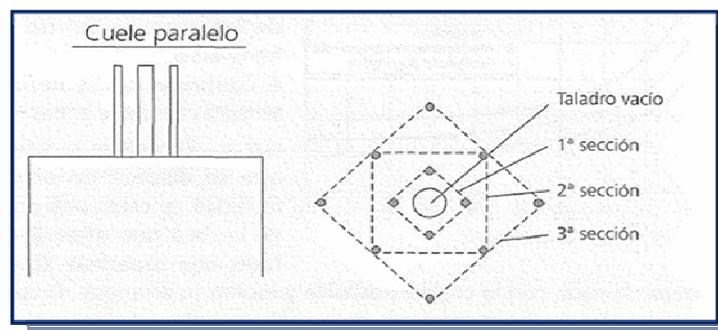


Figura 12.- Cuele Paralelo.
 Fuente: <http://www.danotario.com/tuneles/voladura.php>

El esquema geométrico general de un cuele con barrenos paralelos se indica en la Figura 6. La distancia entre el barreno central de expansión y los barrenos de la primera sección, no debe exceder de “ $1.7D_2$ ” para obtener una fragmentación y salida satisfactoria de la roca Langrefors y Kihlstrom 1963. Las condiciones de fragmentación varían mucho dependiendo del tipo de explosivo, características de la roca, distancia de la roca, distancia entre el barreno cargado y el vacío.

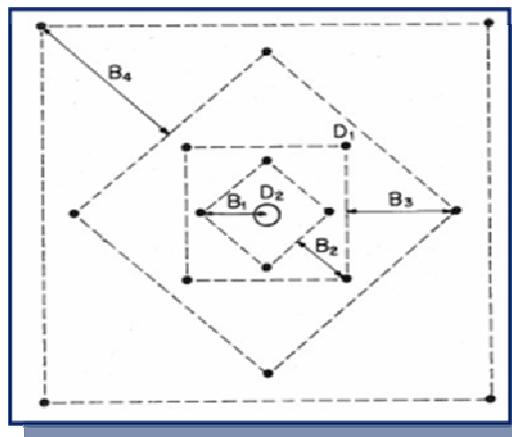


Figura 13.- Cuele de Cuatro Secciones.
Fuente: Manual de perforación y voladura.

Tabla 1.- Relación Sección Burden.

Sección del Corte	Valor del Burden	Lado de la Sección
Primera	$B_1=1.5 \cdot D_2$	$(\sqrt{B_1}) \cdot 2$
Segunda	$B_2=(\sqrt{B_1}) \cdot 2$	$1.5 \cdot (\sqrt{B_2}) \cdot 2$
Tercera	$B_3=1.5 \cdot (\sqrt{B_2}) \cdot 2$	$1.5 \cdot (\sqrt{B_3}) \cdot 2$
Cuarta	$B_4=1.5 \cdot (\sqrt{B_3}) \cdot 2$	$1.5 \cdot (\sqrt{B_4}) \cdot 2$

Fuente: perforación en minería subterránea, por ingeniero Daniel Marcos Valverde presentación power point.

Tal como se refleja en la Fig. 7 Para piedras mayores de “ $2D_2$ ” el ángulo de salida es demasiado pequeño y se produce una deformación plástica de la roca entre los dos barrenos. Incluso si la piedra es inferior a “ D_2 ”, pero la concentración de carga es muy elevada se producirá la sintetización de la roca fragmentada y el fallo del cuele. Por eso, se recomienda que las piedras se calculen sobre la base de “ $B_1=1.5D_2$ ” y las demás sección como lo indica en la tabla 1.

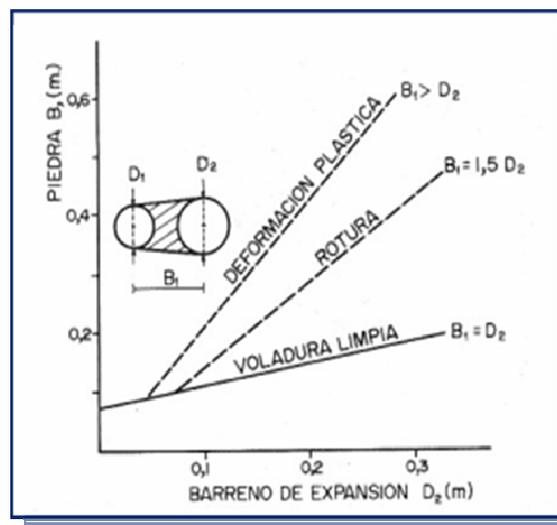


Figura 14.- Relación Diámetro de Barreno y Piedra.
Fuente Manual de perforación y voladura

✓ **Tipos De Cortes Paralelos.**

Los esquemas básicos con taladros paralelos son:

- Corte quemado.
- Corte cilíndrico con taladros de alivio.
- Corte escalonado por tajadas horizontales.

Todos ellos con diferentes variantes de acuerdo a las condiciones de la roca y la experiencia lograda en diversas aplicaciones. Siendo el más utilizado en la construcción de túneles el corte quemado, el cual se explica a continuación:

➤ **Corte quemado.**

Comprende a un grupo de taladros de igual diámetro perforados cercanamente entre sí con distintos trazos o figuras de distribución, algunos de los cuales no contienen carga explosiva de modo que sus espacios vacíos actúan como caras libres para la acción de los taladros con carga explosiva cuando detonan.

El diseño más simple es de un rombo con cinco taladros, cuatro vacíos en los vértices y uno cargado al centro. Para ciertas condiciones de roca el esquema se invierte con el taladro central vacío y los cuatro restantes cargados. También son usuales esquemas con seis, nueve y más taladros con distribución cuadrática, donde la mitad va con carga y el resto vacío, alternándose en formas diferentes, usualmente triángulos y rombos. Esquemas más complicados, como los denominados cortes suecos, presentan secuencias de salida en espiral o caracol.

2.8.2. Destroza.

La destroza es la parte central y más amplia de la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.

2.8.3. Zapateras.

La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras de suelo. Los taladros extremos suelen ir un poco abiertos hacia fuera con objeto de dejar sitio suficiente para la perforación del siguiente avance. Los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba. Son disparados en último lugar.

2.8.4. Contorno.

Los taladros perimetrales o de contorno son importantes pues de ellos dependerá la forma perimetral de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca lo dificultan.

2.8.5. Contracuele.

Son los taladros que rodean a los taladros de arranque y forman las salidas hacia la cavidad inicial. De acuerdo a la dimensión del frente varía su número y distribución comprendiendo a las primeras ayudas (contracueles), segunda y terceras ayudas (taladros de destrozo o franqueo). Salen en segundo término.

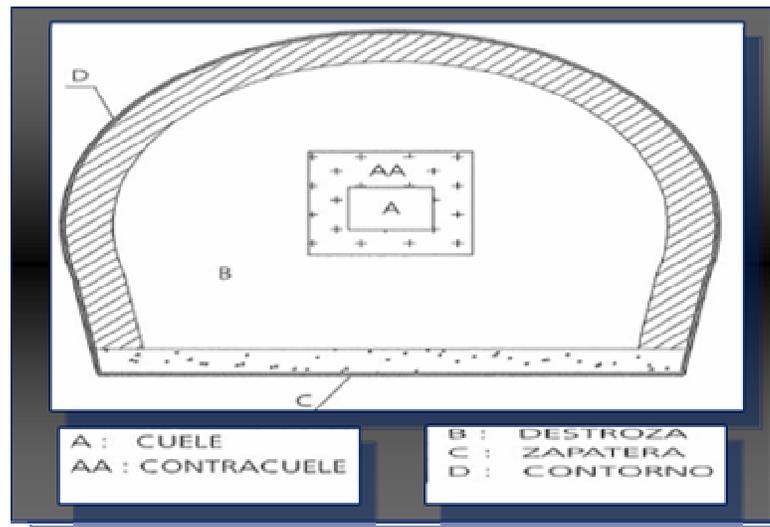


Figura 15.- Zona del Esquema de Perforación.
Fuente: <http://www.danotario.com/tuneles/voladura6.JPG>

2.9. Carga de los Taladros con Explosivo y Tendido del Sistema de Iniciación.

Antes de comenzar con la carga de los taladros es muy importante tener en cuenta el tipo de explosivos que debemos emplear a continuación se definen

los tipos de explosivos que podemos encontrar en el mercado, y las características generales de los mismos.

2.9.1. Explosivos.

Es toda aquella sustancia que por alguna causa externa (roce, calor, percusión, etc.) se transforma en gases; liberando calor, presión o radiación en un tiempo muy breve. Y estos se clasifican en:

- Lentos (pólvora).
- Violentos (dinamitas).
- Seguridad (dinamitas especiales para minas de carbón).
- Mechas y detonadores (corrientes y eléctricas).

2.9.1.1. Tipos De Explosivos.



Figura 16.- Clasificación de los Explosivos.
Fuente: Elaborado por los autores.

➤ **Pólvora.**

La pólvora es una sustancia explosiva utilizada principalmente como propulsor de proyectiles en las armas de fuego, y como propulsor y con fines acústicos en los juegos pirotécnicos. La primera pólvora descubierta es la denominada pólvora negra, que está compuesta de determinadas proporciones de carbono, azufre y nitrato de potasio. Tiene la siguiente proporción: 75% de nitrato de potasio, 15% de carbono y 10% de azufre. Actualmente se utiliza en pirotécnicos y como propelente de proyectiles en armas antiguas. Las modernas pólvoras están basadas en explosivos, como el TNT, que con diversos elementos reduce su velocidad de combustión a fin de lograr un efecto de propelente antes que un efecto explosivo puro.

➤ **Agentes Explosivos.**

Los agentes explosivos consisten en una mezcla de combustible y agentes oxidantes, entre ellos tenemos:

➤ **Agentes explosivos secos (Anfo).**

Es una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, desde gasolinas a aceites de motor. Estas mezclas son muy utilizadas principalmente por las empresas mineras y de demolición, debido a que son muy seguras, baratas y sus componentes se pueden adquirir con mucha facilidad. Las cantidades de nitrato de amonio y combustible varían según la longitud de la cadena hidrocarbonada del combustible utilizado. Los porcentajes van del 90% al 97% de nitrato de amonio y del 3% al 10% de combustible

➤ **Anfo pesado.**

Es un nuevo explosivo conseguido mediante la mezcla adecuada de una emulsión explosivo y un ANFO.

➤ **Lechadas explosivas.**

Este tipo de agentes explosivos contienen nitrato de amonio en una solución acuosa. Dependiendo de los ingredientes pueden ser clasificados como agentes explosivos o como explosivos

➤ **Emulsiones explosivas.**

Son unas soluciones estables de dos líquidos, una solución acuosa y un compuesto orgánico aceitoso, inmiscible entre si pero con un emulsionante se mantienen en estado disperso

➤ **Dinamitas.**

La dinamita común está formada por: Nitroglicerina, nitrato de sodio, pulpa de madera y otros. El porcentaje de nitroglicerina varía entre 15- 60 %, produce gases nocivos por lo que en lugares cerrados como túneles debe haber una muy buena ventilación.

✓ **Tipos de Dinamita.**

- **Dinamita amónica:** Dinamita de nitroglicerina a la cual se ha agregado nitrato de amonio, esta produce menos gases nocivos pero no resisten la humedad.
- **Gelatina explosiva:** Está formada por una mezcla de algodón, ácido nítrico y nitroglicerina. Es uno de los explosivos más poderosos y violentos que se conocen.
- **Dinamita gelatinosa:** Se obtiene disolviendo pólvora en nitroglicerina, es densa tiene características plásticas. Se puede taquear muy en el

barreno por lo que se obtiene una gran velocidad de explosión, es resistente al agua no produce grandes cantidades de gases tóxicos y es especial para ser usada en túneles.

- **Geles:** Este explosivo generalmente tiene una consistencia plástica y es de alta densidad. Entre los cuales existen:
 - o **Gel explosivo:** Este explosivo tiene altas velocidades de detonación y un excelente comportamiento de resistencia al agua pero emite un gran volumen de humos este es el explosivo comercial más potente.
 - o **Straight Gel:** Este tipo de explosivo es usado cuando se necesita fragmentar rocas muy duras, o en el fondo del barreno como inicializador de un agente explosivo.
 - o **Gel Amoniaca:** Este gel explosivo se puede comparar con el Straight Gel en cuanto a su fuerza; el explosivo fue desarrollado como un remplazo económico Straight Gel. El gel amoniacal es fabricado con una fuerza por peso que varía entre 30% y 80% aproximadamente.
 - o **Semigeles:** La fuerza por peso de este tipo de explosivo varía entre el 60% y 65%. Este explosivo tiene las mismas propiedades que el gel amoniacal; los semigeles son usados como reemplazos de los geles amoniacales cuando es necesario una mayor resistencia al agua.
 - o **Hidrogeles:** También llamados papillas explosivas, están formados por un oxidante, generalmente un nitrato y un reductor junto a los gelatinizantes y estabilizantes, que le da una buena consistencia e impiden la difusión dentro de este, por lo que resiste muy bien la humedad y el agua de los barrenos.

2.9.1.2. Características Generales De Los Explosivos.

Fernández 1998 cada explosivo tienen características específicas definidas por sus propiedades, para el mismo tipo de explosivo las características pueden variar dependiendo del fabricante, el conocimiento de estas propiedades es un factor importante para un buen diseño de voladura, además permite elegir el más adecuado según sea el caso. A continuación mencionaremos las propiedades más importantes de los explosivos.

➤ Estabilidad química.

Aptitud que poseen los explosivos para mantenerse químicamente inalterado durante un corto tiempo. Las pérdidas de estas aptitudes se suelen dar por un almacenamiento prolongado o bien porque el sitio de almacenaje no es el adecuado. Cuando se produce la pérdida de estabilidad química de un explosivo, se debe destruir o quemar debido a que estos aumentan su sensibilidad y pueden explotar con facilidad.

➤ Sensibilidad.

La sensibilidad de los explosivos es la mayor a menor facilidad de que este tiene para ser detonado. Se dice que es muy sensible cuando detona con facilidad al detonador o fulminante, la dinamita sensible asegura una buena detonación del disparo. No se pueden usar distintas dinamitas en un disparo ni en un barreno, este debe de ser sensible al detonador como a la onda explosiva.

➤ Velocidad de detonación.

La velocidad de detonación (VOD) es la velocidad expresada en metros por segundo a la que ocurre la reacción química entre el combustible y el oxidante, y se genera a lo largo de la columna del explosivo, teniendo un

rango de 1.500 a 7.500 m/s para los explosivos de uso industrial.

➤ **Potencia explosiva.**

La potencia de un explosivo o dinamita depende del porcentaje de nitroglicerina que contenga, que, a su vez es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad o capacidad para hacer el trabajo de fragmentación y proyectar la roca o el mineral que se quiera romper, a mayor velocidad mayor es su potencia.

➤ **Densidad de encartuchado.**

La densidad de encartuchado es también una característica importante de los explosivos, que depende de gran parte de la granulometría de los componentes sólidos, y tipo de materia prima empleada en su fabricación. La densidad de empaque de los explosivos se expresa como el número de cartuchos por caja de 25 kilogramos.

➤ **Densidad y gravedad específica.**

Este parámetro es muy importante, ya que los explosivos se compran, almacenan y utilizan en base al peso. La densidad se expresa normalmente en términos de gravedad específica, que relaciona la densidad del agua, y determina el peso de explosivo que puede cargarse dentro de una perforación.

➤ **Resistencia al agua.**

Es la característica mediante a la cual los explosivos mantienen sus propiedades inalterables, un tiempo lo cual permite que sea utilizada en barrenos con agua. Hay que hacer una diferencia entre dinamita sumergida en agua, en contacto con el agua o húmeda.

➤ **Inflamabilidad.**

Es la facilidad con la cual un explosivo o agente de voladura puede iniciarse por medio de llama o calor.

➤ **Emanaciones o humos.**

Es el conjunto de los productos resultantes de una explosión, tales como dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, los cuales no son tan tóxicos, pero también pueden formarse gases venenosos como el monóxido carbonoso y óxidos de nitrógeno. En trabajos a cielo abierto las emanaciones se pueden dispersar rápidamente por el aire, por lo que provocan poca preocupación, pero en trabajos subterráneos o espacios confinados deben considerarse detenidamente.

2.9.1.3. Almacenamiento De Explosivos.

Para realizar cualquier actividad que requiera explosivos, se deben contemplar instalaciones adecuadas para su almacenamiento seguro y apropiado, así como también de las materias primas que son necesarias para su obtención. Nos referimos especialmente al nitrato de amonio, el que se debe almacenar en canchas, sacos y/o silos. Estas instalaciones son las llamadas polvorines, las cuales deben de estar ubicadas lejos del lugar de trabajo.

➤ **Polvorines.**

Se entiende por polvorín, a la estructura fabricada, aprobada y aceptado, especialmente para almacenar explosivos. En la figura 17 se muestra las distintas vistas del polvorín, sus medidas van de acuerdo a la magnitud de la obra y a la cantidad de los explosivos a utilizar.

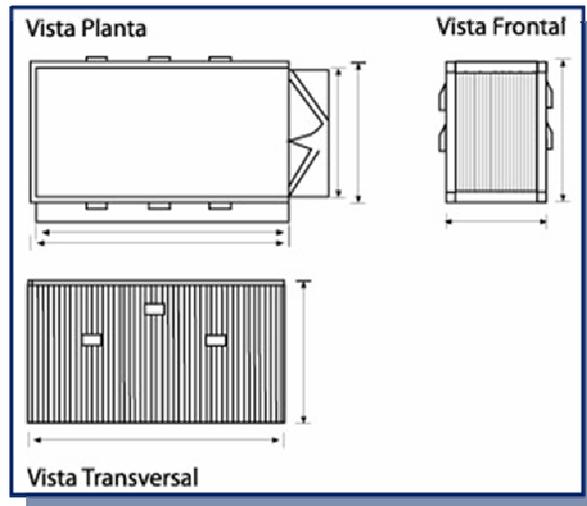


Figura 17.- Vistas de un Polvorín.

Fuente: <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-almacenamiento.html>

✓ **Características más importantes del polvorín.**

- Todo almacén o recinto destinado a almacenar explosivos debe permanecer cerrado y vigilado por personal idóneo, previamente autorizado y capacitado para tal propósito.
- En el polvorín debe existir un libro autorizado, en el que se deben registrar todas las entradas y salidas de productos explosivos, indicando antecedentes tales como fechas (entrada y salida) y tipo de producto. Este libro debe ser administrado por la persona responsable del polvorín, comúnmente llamado polvorinero.
- Los depósitos deben tener instrumentos para medir temperatura (termómetro) y humedad (higrómetro). El polvorinero debe registrar las lecturas de los instrumentos una vez por día en un libro exclusivo para este propósito.

✓ **Clasificación de los polvorines.**

Los polvorines se clasifican de acuerdo con su ubicación como se muestra en el siguiente esquema:

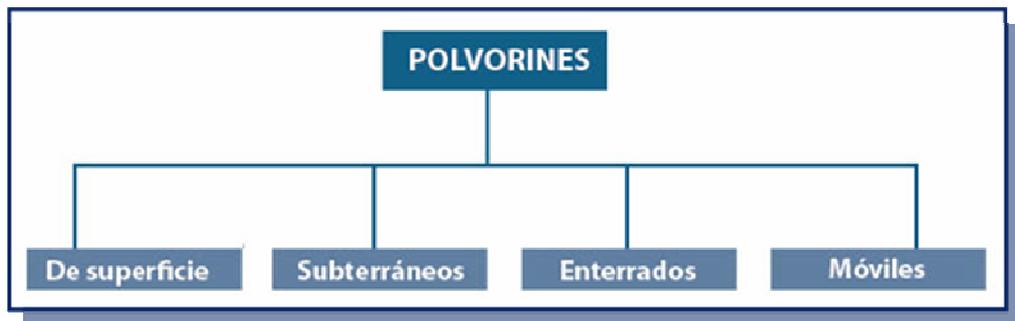


Figura 18.- Clasificación de los Polvorines.

Fuente: <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-almacenamiento.html>

- **Polvorines de Superficie:** Son edificaciones a la intemperie en cuyo entorno pueden existir o no barricadas naturales o artificiales. La capacidad máxima de cada polvorín superficial será de veinticinco mil kilogramos netos (25.000 Kg) de materia reglamentada (explosivo).



Figura 19.- Polvorín Superficial.

Fuente: <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-almacenamiento.html>

- **Polvorines semienterrados:** Estarán recubiertos por tierra en todas sus caras, excepto en la frontal. Este recubrimiento tendrá un espesor mínimo de un metro (1mt) en la parte superior del edificio, descendiendo las tierras por todas sus partes y no pudiendo tener en ninguno de sus puntos de caída un espesor inferior a un metro (1mt). La capacidad máxima de almacenamiento de cada polvorín semienterrado será de cincuenta mil kilogramos netos (50.000 Kg).



Figura 20.- Polvorín Semienterrado.

Fuente: <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-almacenamiento.html>.

- **Polvorines enterrados:** Los polvorines enterrados son aquellos que se instalan en socavones o galerías sin comunicación con otras labores subterráneas en actividad. También pueden estar contruidos en una bóveda recubierta de tierra suelta, con una techumbre adecuadamente resistente para soportarla.
- **Polvorines subterráneos:** Son excavaciones a las que se accede desde el exterior mediante un túnel, una rampa, un pozo inclinado o un pozo vertical, están contruidos en galerías o túneles que tienen comunicación con otras galerías. En general, se destinan al

almacenamiento temporal de explosivos. La capacidad máxima de cada polvorín subterráneo será de cinco mil kilogramos netos (5000 Kg); pero se limitará a mil kilogramos netos (1000 Kg), si el polvorín está próximo a labores en que se prevea la presencia habitual de personas.

- **Polvorines móviles:** Los polvorines móviles están instalados sobre equipos de transporte, que se desplazan conforme el avance de las faenas. Su construcción debe ser totalmente cerrada e incombustible, recubierta interiormente con material no ferroso y con puertas metálicas de acceso.

✓ **Almacenamiento de explosivos en el polvorín.**

- Los envases con explosivos se colocan en pilas de no más de diez cajas de altura, cuidando de que no se deformen. Si se deforman las cajas de cartón ubicadas en la parte inferior, deben apilarse en cantidades menores.
- Entre las pilas debe dejarse un metro de distancia para permitir el fácil desplazamiento. Las pilas contiguas a los muros de polvorín deben estar separadas de las paredes adyacentes por una distancia que varía entre 0,8 y 2 metros.
- No guardar ropa, útiles de trabajo o cualquier otro elemento extraño dentro del polvorín.
- No almacenar detonadores y explosivos en un mismo polvorín.
- No mantener ni emplear tubos de oxígeno, hidrógeno, acetileno, gas licuado o cualquier otro elemento capaz de producir explosión en los alrededores de los polvorines.

- No mantener almacenados explosivos cuyos envases presenten manchas aceitosas o escurrimientos de líquidos u otros signos evidentes de descomposición. En caso de detectar esta situación, los productos deben separarse inmediatamente para su eliminación.
- No se deben utilizar combustibles o líquidos inflamables para el aseo de los polvorines.

2.9.1.4. Accesorio De Inicialización De Los Explosivos.

Los accesorios que se explican a continuación son los utilizados en la construcción de túneles mediante el método de perforación y voladura.

➤ **Clasificación de los detonadores.**

Estos se clasifican de la siguiente manera:

- ✓ **Detonadores no eléctricos:** Es un sistema de iniciación de detonaciones no eléctrico de cargas explosivas, con tiempos en milisegundos y serie de 23 periodos rangos de retardo de 0 a 1400 milisegundos, se puede usar como iniciador en la perforación y como detonador no eléctrico línea de inicio para la voladura de roca.
- ✓ **Fulminante:** Es una capsula cilíndrica de aluminio o cobre cerrada en un extremo, de diámetro entre 3mm-6mm y una longitud comprendida entre 30mm-60mm, en cuyo interior lleva una cantidad de explosivo muy sensible a la chispa de la guía y otro de alto poder que puede iniciar a la dinamita.
- ✓ **Conectores:** Es una capsula de aluminio parecida al fulminante en cuya parte inferior tiene un corte de 2.38mm de ancho y es paralelo a la base. Detonadores Eléctricos.

- **Estopines eléctricos:** Están formados por un casco metálico cilíndrico que contiene varias cargas de explosivos. Los estopines eléctricos son fulminantes elaborados de tal manera que pueden hacerse detonar con corriente eléctrica. Con ellos pueden iniciarse al mismo tiempo varias cargas de explosivos de gran potencia, y se puede controlar con precisión el momento de la explosión, lo que no sucede con los fulminantes por la variación de la velocidad de combustión de la mecha.

Los estopines eléctricos tienen una corriente mínima y otra de diseño, la primera es aquella a partir de la cual puede ser suficiente para detonar el estopín, y la segunda la corriente con la que se asegura la detonación del mismo. Como se muestra a continuación:

Tabla 2.- Corriente de Disparo Mínima y de Diseño.

ESTOPINES	CORRIENTE	
	MINIMA	PARA DISEÑO
INSTANTANEOS	0.3AMP	2.0 AMP
DE TIEMPO	0.4 AMP	2.0 AMP

Fuente: <http://www.mypfundaciones.com/index.php?s=perforacion&ss=09>

2.9.2. Cantidad De Carga.

Depende de la tenacidad de la roca y de la dimensión del frente de la voladura. Influyen: el número, diámetro y profundidad de los taladros y el tipo de explosivo e iniciadores a emplear. Se debe tener en cuenta que la cantidad de explosivo por metro cuadrado a volar disminuye cuanto más grande sea la sección del túnel, y también que aumenta cuanto más dura sea

la roca, se deben de dejar una distancia libre de 1/3 de la longitud del taladro esto con el objetivo de taponear el mismo con arcilla, tierra húmeda y en algunos casos papel bien confinado, y así evitar la expulsión del explosivo debido a la fuerza de impacto entre roca y explosivo.

En términos generales puede considerarse los siguientes factores en kilogramo de explosivos por metro cúbico de roca. En minería los consumos de dinamita varían generalmente entre 300 a 800 g/m³. Como generalidad, pueden considerar los siguientes factores para:

Tabla 3.- Cantidad de Carga por Metro Cúbico Según el Tipo de Roca.

Tipo de roca	Factor (Kg / m ³)
Muy difíciles	1,5 a 1,8
Difíciles	1,3 a 1,5
Faciles	1,1 a 1,3
Muy faciles	1,0 a 1,2

Fuente: Apuntes de clases.

En donde se puede considerar:

- Rocas muy difíciles: granito, conglomerado, arenisca.
- Rocas difíciles: arenisca sacaroide, arena esquistosa.
- Rocas fáciles: esquisto, arcilla, esquistos arcillosos, lutita.
- Rocas muy fáciles: arcilla esquistosa o rocas muy suaves.

Valores estimados para galería con una sola cara libre, para disparos con 2 caras libres se pueden considerar valores de 0,4 a 0,6 kg/m³.

2.9.9.1. Distribución De La Carga.

➤ **Movimiento de roca.**

✓ **Volumen.**

$$Volumen (V) = S * L$$

Donde:

V: volumen de roca.

S: dimensión de la sección, en.

L: longitud de taladros, en m.

✓ **Tonelaje.**

$$Tonelaje(t) = (V) * \rho$$

Donde:

ρ : densidad de roca, usualmente de 1,5 a 2,5 (ton/m³).

✓ **Cantidad de carga**

$$(Qt) = V * Kg/m^3$$

Donde:

V: volumen estimado, en m³.

K : Carga por.

✓ **Carga promedio por taladro**

$$Qt/N^{\circ}taladros$$

Donde:

Qt: Carga total de explosivo, en kg.

N⁰ taladros: Número de taladros.

En la práctica, para distribuir la carga explosiva, de modo que el corte o

cual sea reforzado, se incrementa de 1,3 a 1,6 veces la “carga promedio” en los taladros del arranque, disminuyendo en proporción las cargas en los cuadradores y alzas (que son los que menos trabajan, ya que actúan por desplome).

➤ **Distribución de la carga por taladros.**

Normalmente la longitud de la columna explosiva varía de 1/2 a 2/3 de la longitud total del taladro, con la carga concentrada al fondo. Para asegurar el corte de arranque es recomendable cargar los taladros de arranque 1,3 a 1,6 veces el promedio calculado, las ayudas 1,1 vez y disminuir proporcionalmente la carga en el resto de taladros. Luego se debe colocar arcilla o papel, para rellenar en el resto del taladro

➤ **Disparo de la voladura.**

En túneles se puede iniciar mediante fulminante-mecha, detonadores no eléctricos de *shock* o eventualmente detonadores eléctricos, pero normalmente para secciones con corte cilindro se prefieren los no eléctricos de miliretardo. En trazos con uno o dos taladros vacíos al centro, de mayor o igual diámetro que los de producción, se suele rodearlos con cuatro, seis o más taladros de arranque que se inician con detonadores de milisegundos, de dos formas: taladros opuestos cruzados con el mismo número de retardo, eje 2 - 2, 3 - 3, 4 - 4, o con series escalonadas intercaladas (ejemplo: 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13) , para limitar vibraciones y proporcionar mayor empuje a los detritos del arranque.

Esta serie cubrirá también a las primeras ayudas. El resto de taladros: segundas ayudas, cuadradores, alzas y arrastres se dispararán con

detonadores de medio segundo en series escalonadas para permitir las salidas del centro hacia fuera debe tenerse en cuenta la recomendación de no emplear tiempos mayores de 100 ms. entre los tiros, para evitar interferencias.

- ✓ **Diagrama de Perforación y Voladura Para Túnel Circular de 6.8 m de Diámetro.**

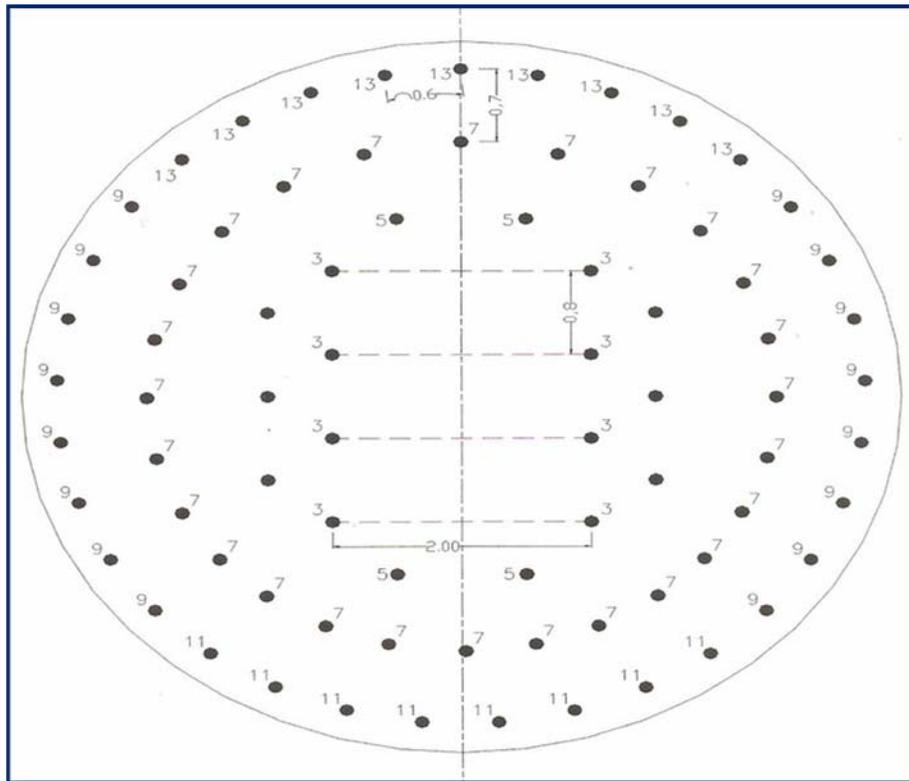


Figura 21.- Diagrama de Perforación.
Fuente: Elaborado por los autores.

➤ **Especificaciones del procedimiento de voladura.**

✓ **Características-Disparo.**

Largo del hueco de perforación= 2,40m.

Nº de huecos= 76.

Nº de fulminantes= 76.

Dinamita/ hueco= 5 cartuchos.

Dinamita/ disparos= 380 cartuchos.

Kg. dinamita/ disparos=380* 0.208 → 79,04 Kg.

$$\frac{M^3}{\text{disparo}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) * (\phi)^2 * L = 87,16m^3$$

Kg. dinamita/ 1m avance= 32.93 Kg.

Nº 3= 8 fulminante.

Nº 5= 10 fulminante.

Nº 7= 26 fulminante.

Nº 9= 14 fulminante.

Nº 11= 9 fulminante.

Nº 13= 9 fulminante.

S. total 76 fulminantes.

Fulminantes/disparos

✓ Diagrama de perforación para túnel de una vía de 4 x 4,20 m.

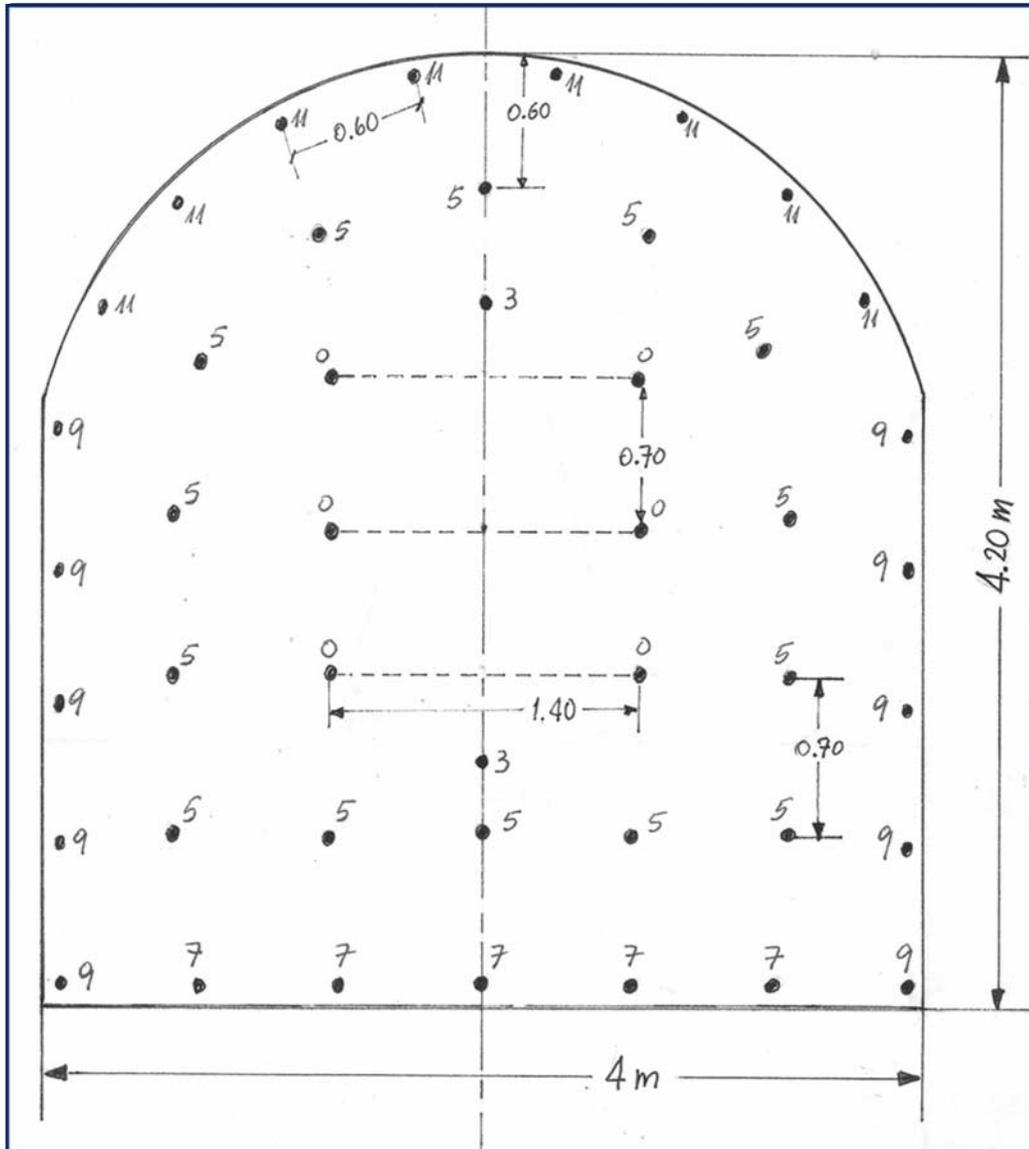


Figura 22.- Vista de Frente.
Fuente: Elaborado por los autores.

✓ **Vista de arriba.**

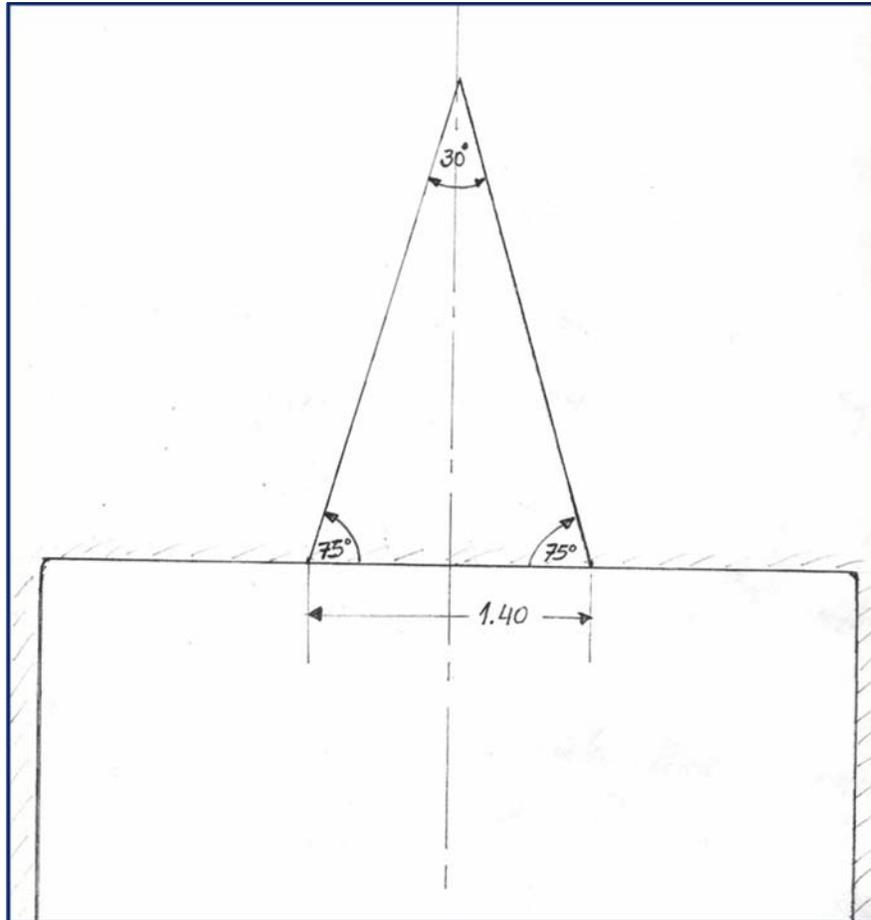


Figura 23.-. Detalle de la Cuña
Fuente: Elaborado por los autores.

➤ **Especificaciones del procedimiento de voladura:**

- ✓ Características-Disparo.
 - Largo del hueco= 2,40 m.
 - Número de huecos= 45.
 - Metros perforados= 108 m.
 - Diámetro de la perforación= 1 ¼".
 - Por disparo= 40,32 .
 - Tons/ disparo= 100,80 tons.

Dinamita/hueco= 5 cartuchos.

Dinamita/ disparo= 46,8 kg/disparo.

Rendimiento del explosivo= 19,5 Kg/ metro túnel.

Fulminantes

Todos los huecos con un fulminante al fondo, menos los huecos del piso (Zapateros) que llevan un fulminante al fondo y otro en el taco.

Nº 0= 6 fulminante.

Nº 3= 2 fulminante.

Nº 5= 14 fulminante.

Nº 7= 10 fulminante.

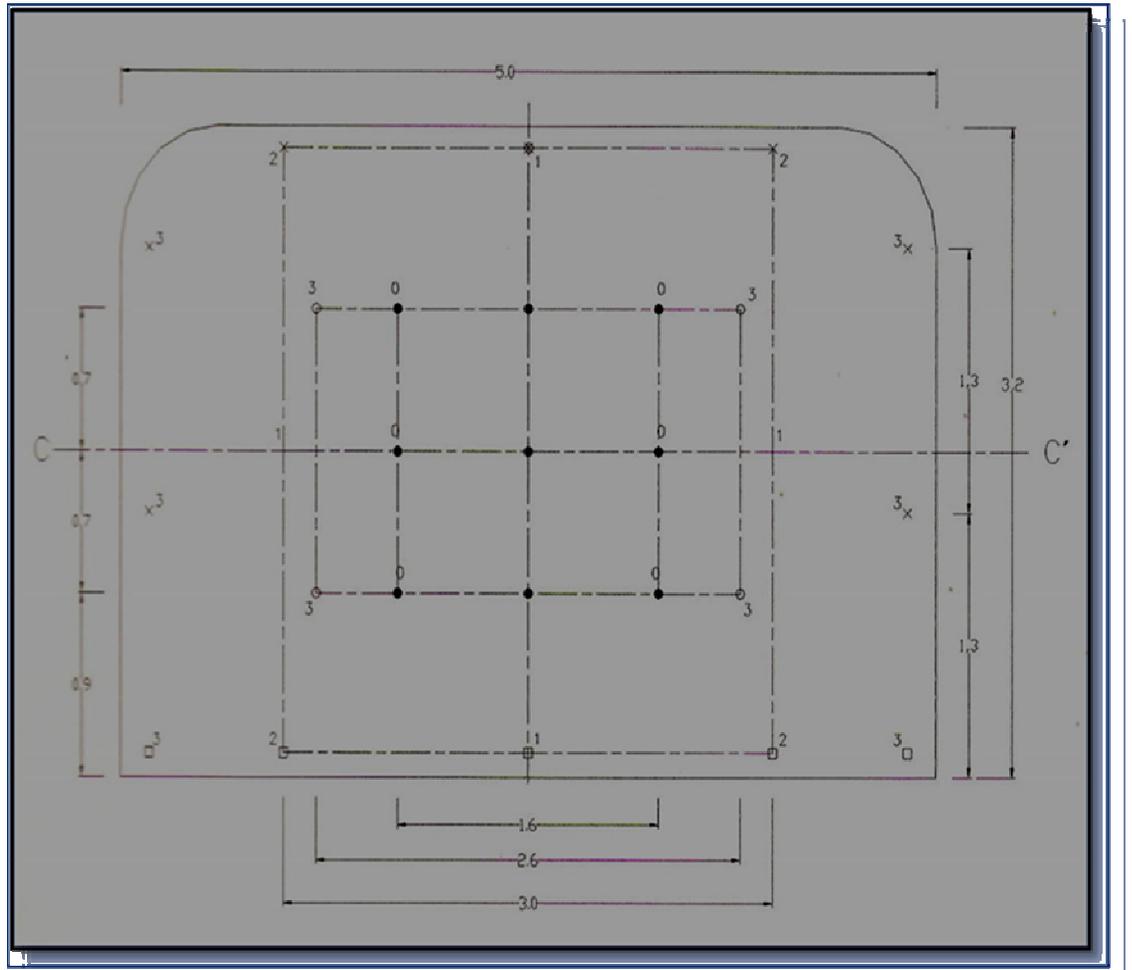
Nº 9= 10 fulminante.

Nº 11= 8 fulminante.

S. total 50 fulminantes

Fulminantes/disparos =50

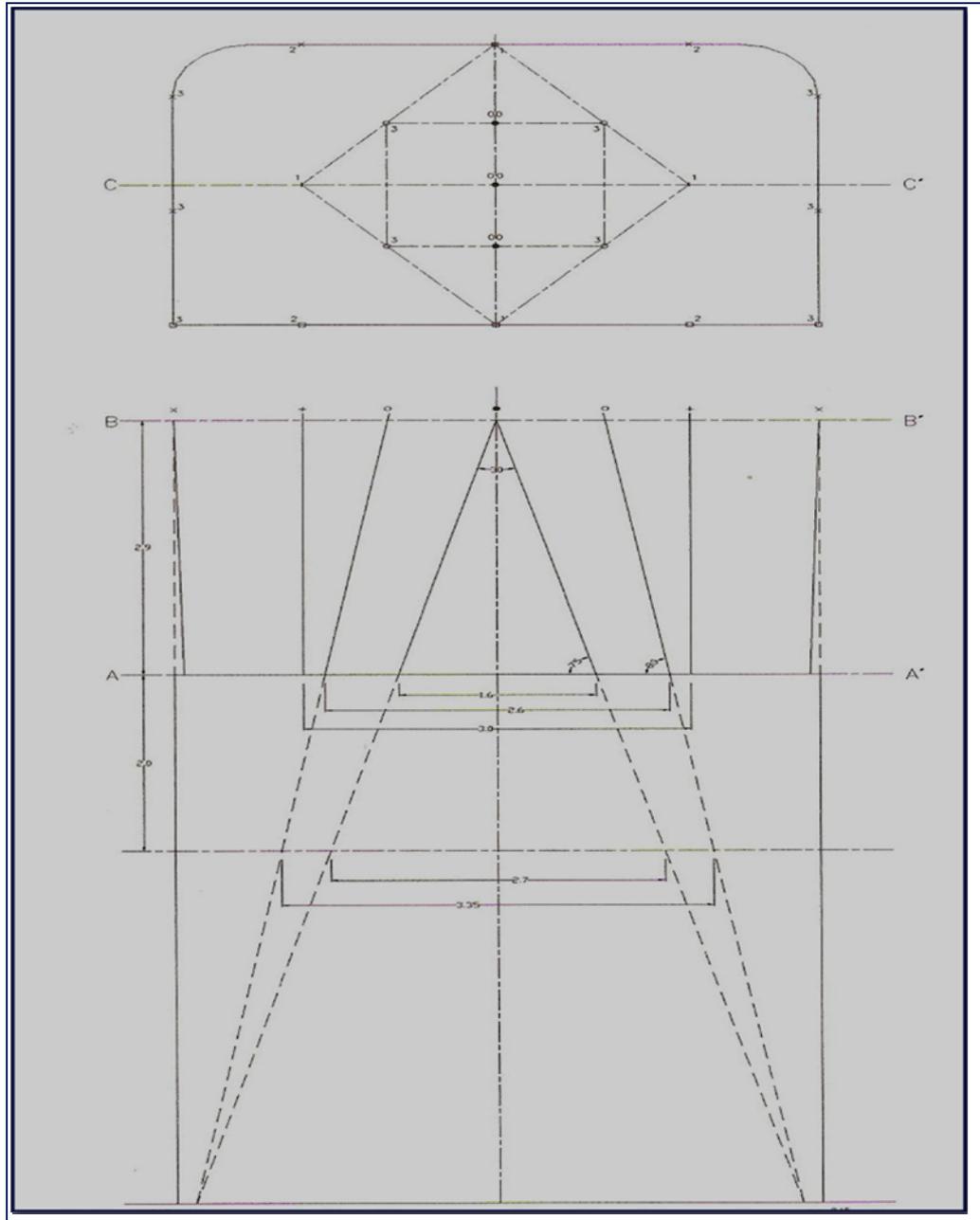
- ✓ **Diagrama de Perforación Para un Túnel Vial, con una Sección de 1,6 m².**



Frente (A-A')

Figura 24.- Diagrama de Disparo Jumbo.

Fuente: Elaborado por los autores.



- Frente (B-B')

Figura 25.- Diagrama de Disparos Jumbo.

Fuente: Elaborado por los autores.

✓ **Características del disparo.**

Sección= $5,0 \times 3,2 = 16,0$.

Avance máximo= 2,9 m.

Tons/ disparo= 125 tons.

Diámetro de perforación= 2".

Números de taladros= 24.

Longitud taladros= 3,05 m.

Metros perforados= 73,2 m.

Rendimiento de perforación= 1,7 tons/m. perf. → 43,1 tons/m. avance.

Explosivos= 133,7 kgrs.

Rendimiento del explosivo= 1,07 kgrs/ ton. → 1,83 Kgrs/ m. perf. → 46,1 kgrs/ m. avance.

✓ **Fulminantes:**

Todos los huecos con un fulminante al fondo, menos los huecos del piso (Zapateros) que llevan un fulminante al fondo y otro en los taladros y/o fulminantes miliseg, el resto de los huecos llevan fulminantes corrientes.

Miliseg:

Nº0= 6 fulminantes.

Nº3= 4 fulminantes.

Total= 10 fulminantes.

Corrientes:

Nº1= 5fulminantes.

Nº2= 6 fulminantes.

Nº3= 8 fulminantes.

Total= 19 fulminantes.

Milisegundos= 10 fulminantes.

Corrientes= $\frac{19 \text{ fulminantes.}}{29 \text{ fulminantes.}}$

2.10. Ventilación.

Se debe instalar un sistema de ventilación para mantener la calidad del aire del interior del túnel dentro de unos límites de seguridad. Normalmente se disponen tuberías flexibles de diámetro 800 a 1200 milímetros que se montan por tramos y que se van alargando según avanza la excavación. Los ventiladores se colocan en el exterior, de una obra o también intercalados en la tubería, dentro del túnel, si la longitud de éste es considerable. Normalmente se emplean ventiladores divididos en varios cuerpos, de forma que se conectan uno o varios de éstos dependiendo de la potencia necesaria. Son reversibles, con el fin de poder insuflar aire limpio al frente (en las fases en que hay trabajadores en el interior), o de sacar aire viciado del mismo (después de la voladura para extraer los gases tóxicos producto de la misma). En obras con mucha producción de polvo, como en las excavaciones mediante rozadora, se suele emplear un filtro de polvo además del sistema anteriormente descrito. El filtro toma aire del frente y lo hace pasar a través de una cámara donde hay instalados unos pulverizadores de agua. Las gotas de agua fijan el polvo y lo hacen decantar, saliendo el aire limpio.

- a) Trabajo normal Ventilador
- b) Tras la voladura Ventilador U Gas tóxico

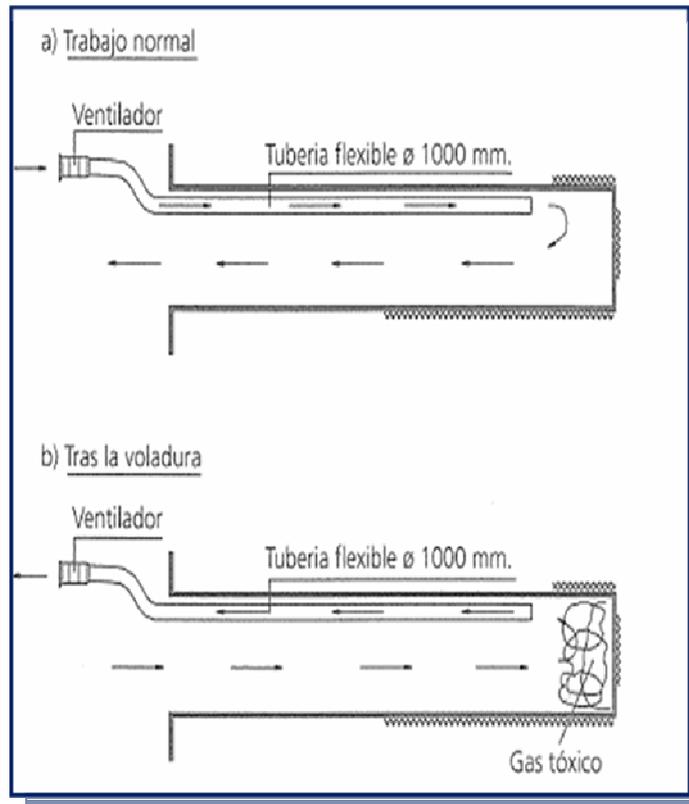


Figura 26.- Diversos Sistemas de Ventilación.

Fuente:

http://www.geoconsult.es/fotos/Publicaciones/Manual/12_seg.pdf

2.11. Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

2.11.1. Retirada del escombros.

Es fundamental quitar el escombros rápidamente para que puedan iniciarse las tareas de sostenimiento, sacándolo al exterior para que no dificulte el movimiento de máquinas y materiales por el túnel.

El sistema a emplear dependerá de la cantidad de material a transportar por ciclo y de la longitud de transporte. En túneles de carretera las secciones de excavación son grandes (entre 80 y 110 m² por lo general), con lo que el

volumen de escombros es importante. Esto hace que no se usen en general los sistemas de transporte mediante cinta o vagones, sino los sistemas mediante maquinaria sobre neumáticos.

Los métodos más usuales, en función de la distancia de transporte, son los siguientes:

2.11.1.1. Palas Cargadoras De Perfil Bajo.

Para distancias cortas (inferiores a unos 500 metros) y túneles de pequeña y mediana sección, se utiliza una pala con una cuchara de gran capacidad (3m^3) que carga el escombros del frente y lo lleva hasta el exterior. No es necesario girar la máquina ya que el maquinista se sienta lateralmente y puede conducir igualmente en ambos sentidos. Para distancias más largas se utilizan zonas de acopio intermedio de escombros.

2.11.1.2. Pala Cargadora Más Camión Dumper.

Se usa en distancias mayores de 500 metros en túneles de gran sección ($>70\text{ m}^2$). Una pala cargadora sobre neumáticos recoge el escombros y lo carga sobre camión, que lo saca fuera del túnel. La pala suele ser articulada para facilitar sus movimientos dentro del túnel. Si la distancia es muy grande, se pueden habilitar zonas de ensanche a lo largo del túnel que permiten el cruce de camiones dumper o emplear dumpers formados por una cabeza tractora y cajas desacoplables.

Cuando la excavación se realiza con máquina tuneladora y para túneles de gran sección, la extracción de escombros se realiza con camiones dumper que son cargados en el frente por la cinta porticada del topo.

2.11.1.3. Vagonetas Sobre Vía.

Para túneles muy largos y de secciones medianas, la extracción de escombros se realiza con vagonetas sobre vía. Son recomendables para distancias de transporte superiores a los 1500 m.

2.11.1.4. Saneo Del Frente, Bóvedas y Hastiales.

Se descombra la roca fragmentada resultante de la voladura del frente, bóvedas y hastiales y se sanea el frente. Se debe mantener la estabilidad de la bóveda, y hastiales hasta el sostenimiento definitivo mediante vigilancia y saneo periódico del frente.

Si se observan que algunas mechas, como medidas de seguridad no deberán intentar prender de nuevo una mecha apagada ni intentar extraer cartuchos fallidos, bajo ningún concepto. La forma correcta de actuar en el caso de un fallo parcial o total de una pega es el siguiente; Se debe esperar 15 o 30 minutos, luego se continua con el saneo del frente y se perfora un barreno paralelo al fallido y se hace la explosión conjunta de ambos barrenos.

En las labores de saneo se debe tener mucho cuidado y revisar los escombros puesto a que entre los mismos podrían hallarse la presencia de barrenos fallidos, debido a detonadores en mal estado, conexiones incorrectas, resistencia inadecuada, mecha o cordón detonante en mal estado, empalmes, etc.

2.12. Hormigón proyectado.

El número de capas incluye la capa inicial de sellado, que no es necesario para macizos rocosos de calidad muy buena. Los espesores de cada capa no deben exceder de 10 cm para evitar problemas de adherencia. Los

espesores reales dependen de la precisión de la excavación. Si se deben rellenar las sobreexcavaciones, y/o cubrir las cerchas, los espesores reales pueden ser mucho mayores en algunos puntos. Se recomiendan el uso de fibras metálicas para macizos de calidad media a buena y el de mallazo para macizos de calidad mala a muy mala. Cuando no es necesario el hormigón proyectado (en macizos de calidad muy buena) puede ser conveniente el uso ocasional de mallazo como protección contra la caída de cuñas rocosas aisladas.

2.13. Entibación.

Se entiende como entibación al conjunto de elementos que se colocan durante la ejecución de un túnel, cuando las condiciones de la roca lo requieren, y cuya finalidad es doble:

- Proteger con seguridad suficiente al personal.
- Asegurar la estabilidad de la excavación, respetando la forma y dimensiones exigidas en el proyecto.

El diseño debe ser hecho en forma racional, es decir, debe proyectarse el tipo de sostenimiento que efectivamente se requiere para cada caso y en la cantidad realmente necesaria. La importancia del sostenimiento es decisiva pues de este depende la estabilidad del túnel. El revestimiento solo se aplica normalmente, bastante tiempo después que la roca ha alcanzado un equilibrio final, salvo en los casos donde se coloca por razones de tipo hidráulico o estático.

2.13.1 Forma de actuar de una entibación.

Según su comportamiento estructural pueden ser:

2.13.1.1. Rígida: Cuando es prácticamente indeformable, es decir, no permite desplazamiento de la roca.

2.13.1.2. Flexible: Cuando permite deformaciones controlada de la roca.

Según la presión que puede ejercer o recibir se distinguen dos formas de actuar de una entibación puede ejercer una presión de estabilización contra la roca si se aplica durante la fase de la descompresión; limita las deformaciones permitiendo la redistribución de tensiones y posibilita a la roca poder resistir por si misma las presiones del cerro al no perder totalmente sus propiedades mecánicas.

Puede recibir una presión de descompresión o de soporte, la presión la ejerce la roca totalmente suelta que al haber perdido sus propiedades mecánicas, ya no es capaz de transmitir esfuerzo y sólo actúa libremente por su propio peso. Esta pérdida se debe por una parte, a un paro hecho sin ningún cuidado, que deja a la roca excesivamente agrietada.

Cuando la galería de avance se realiza en roca consistente puede limitarse a cabezales apoyados en cajas expresamente realizadas en las paredes de la galería; el cabezal debe quedar exactamente encajado en ellas; entra oblicuamente y luego se va forzando hasta ponerlo normal al eje; si hay huelgos en algún sentido, se retaca el cabezal con cuñas de madera que lo fijen.

2.14. Ventajas de construir un túnel con el método de perforación y voladura.

- Disponibilidad inmediata de los equipos técnicos y humanos en cualquier parte del mundo
- Los nuevos diseños de voladura planificados por los profesionales,

requieren emplear mucho menos energía, menor cantidad de explosivos y consiguen una mejor y más precisa fragmentación de la roca y superficie de contorno, facilitando además las labores de descombro y saneo.

- Los explosivos de última generación desarrollados son adaptables a las condiciones ambientales de las obras e insensibles a los posibles impactos, permiten altos niveles de seguridad en su transporte y manipulación.
- Adaptación del sistema a cualquier morfología de terreno, independientemente del diámetro de sección o longitud del túnel a construir.
- Mantenimiento y reposición de equipos en tiempo récord.
- Se controlan las vibraciones producidas por las voladuras.
- Progreso continuo en la construcción del túnel sean cuales sean las variaciones geológicas encontradas en el avance de obra.
- El explosivo es el método más flexible para construir un túnel, su versatilidad le permite adaptarse a cualquier circunstancia o variable que presente el terreno, frente a los medios mecánicos concebidos fundamentalmente para unas determinadas condiciones geológicas y con dificultad para adaptarse a las alteraciones que éstas probablemente presenten, derivando en problemas operativos que compliquen y alarguen de forma significativa el plazo de ejecución de la obra, con el consiguiente perjuicio económico que esto supone.
- Reducción de los costos, los altos niveles de rendimiento global que supone la aplicación del sistema de perforación y voladura para la construcción de túneles redundan en un sustancial ahorro económico.

2.15. Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (Cavim).

La Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (Cavim), fue

creada por el Estado Venezolano según el Decreto Presidencial 883, de fecha 29 de abril de 1.975, con el fin de atender el desarrollo de la Industria Militar.

Su principal objetivo es la explotación comercial de las industrias destinadas a la fabricación de Armamentos, Municiones, Explosivos y otros materiales y equipos que interesen a los fines de la Defensa Nacional que sean afines o conexos con su actividad industrial. De esa manera nace Cavim.

Con nuestro aporte colaboramos con la seguridad y defensa del estado, la industria minera, de la construcción, química, petrolera y vialidad.

Para desarrollar esta loable misión, cuentan con un personal calificado y adiestrado, siendo el activo y el valor más grande de la empresa, ya que a partir de ese tecnicismo, apego, abnegación, lealtad y sentido de pertenencia, han logrado todos los objetivos planteados, con calidad, colocando a Cavim en la cresta de la ola.

Lo cual queda evidenciado con la Certificación de Calidad ISO 9001 de las Plantas ubicadas en Morón y Maracay, Planta de Nitrocelulosa, Agentes de Voladuras, Ácido Nítrico, Ansol y Municiones.

2.16. Comentarios finales.

El método de perforación y voladura es la forma principal de acometer las grandes excavaciones en roca que se demandan tanto en minería como en el campo de las obras públicas. Así, la existencia de gran parte de las infraestructuras de nuestro país está ligada al empleo de los explosivos: muchas de las obras de presas, centrales hidroeléctricas, carreteras, autopistas, líneas férreas, líneas de alta velocidad, etc. se han podido llevar a cabo de una forma económicamente viable gracias a este método de excavación. Los últimos avances tecnológicos hacen que sea un método aún más económico, versátil y productivo; especialmente en la excavación de túneles, donde la evolución de equipos y productos ha tenido una repercusión determinante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Centro de diseño de túneles (CETU). (1990), Actas de túneles piloto 2 y Geometría, CETU.
2. Centro de diseño de túneles (CETU). (1993), Perfil en presas construcción de túneles de carretera CETU.
3. Megan, T. y Bartlett J. (1988). TÚNELES, Planeación, Diseño y Construcción Volumen 1 (1era Edición). México: Limusa.
4. Galabru, P. Cimentaciones y Túneles. Editorial Reverte.
5. Túneles y obras subterráneas, editores técnicos asociados, S.A. Barcelona, España 1.972(Jacques Veschamps).
6. Manual del ingeniero civil, Frederick S.Merritt, editorial Mcgraw Hill, tercera edición, tomo IV, año 1.992
7. Manual práctico de voladura EXSA. Edición especial.
8. Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto geológico y minero de España, año 1.987, (EPM), estudios y proyectos mineros año 1.987.
9. <http://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/t-propiedades-explosivos.html>
10. <http://html.rincondelvago.com/perforaciones.html>

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	Construcción de túneles en roca dura mediante el método de perforación y voladura
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Abdul Khalek M., Fadia.	CVLAC: 17.411.006 E MAIL: <u>fadis_2@hotmail.com</u>
Acosta C., Nomar A.	CVLAC: 17.010.314 E MAIL: <u>Nomar-84@hotmail.com</u>
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES: Construcción de túneles, métodos de perforación y voladura, explosivos.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Civil

RESUMEN (ABSTRACT):

En la construcción de túneles contamos con diferentes opciones que vienen dados por métodos constructivos como lo son: el método de excavación mecánica, mediante el empleo de maquinas rozadoras y tuneladora y el método de perforación y voladura, el cual resulta el más apropiado cuando el tipo de roca existente en el espacio seleccionado, presenta una estructura abrasiva, y se halla en estado masivo, en este método se emplean diversos tipos de explosivos, los cuales son evaluados antes de ser aplicados, con el objetivo fundamental de escoger el más apropiado, se evalúan factores como la densidad y velocidad de detonación, las características de la roca y las condiciones que presenta el suelo sobre el cual se va a trabajar. Se debe de establecer un sistema de avance seguro y un buen diseño de la sección del frente de ataque del túnel, que visualice una adecuada ubicación del cuele, y así contar con una cavidad inicial que permita más caras libres, con el fin de evitar atraso en el ciclo de trabajo.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Hidalgo S., Esteban D.	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	12.575.113			
	E_MAIL	<u>ehidalgo21@hotmail.com</u>			
	E_MAIL				
Torres M., Luisa C.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.217.436			
	E_MAIL	<u>torresl62@gmail.com</u>			
	E_MAIL				
Montejo A., Enrique.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.279.503			
	E_MAIL	<u>emontejo@cantv.net</u>			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	12	08
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Construcción de túneles en roca dura.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Civil

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Civil

INSTITUCIÓN:

Universidad De Oriente. Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

AUTOR

Abdul Khalek M., Fadia

AUTOR

Acosta C., Nomar A.

TUTOR

Hidalgo S. Esteban D.

JURADO

Torres M. Luisa C.

JURADO

Montejo A. Enrique.

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

Saab, Yasser