



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO
DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA**

Carlos René López Ruano

Asesorado por el Ing. Manuel de Jesús Ruano Rodríguez

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO
DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS RENÉ LÓPEZ RUANO

ASESORADO POR EL ING. MANUEL DE JESÚS RUANO RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Hernández Canales
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha noviembre de 2010



Carlos René López Ruano

Guatemala, agosto de 2012

Ingeniero Mario Estuardo Arriola Ávila
Coordinador del Área de Topografía y Transportes
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio hago constar que he asesorado y revisado el trabajo de graduación del estudiante universitario Carlos René López Ruano, titulado: **APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA.**

Para lo cual, después de la realización del análisis y las correcciones debidas de dicho trabajo, considero que cumple con los requisitos para su aprobación final.

Sin otro particular, me suscribo a usted, cordialmente.



Ing. Manuel de Jesús Ruano Rodríguez
Asesor de trabajo de Graduación



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
3 de septiembre de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Carlos René López Ruano, quien contó con la asesoría del Ing. Manuel de Jesús Ruano Rodríguez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA A TODOS

Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
Coordinador del Área de Topografía y Transportes



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
TRANSPORTES
USAC

bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Manuel de Jesús Ruano Rodríguez y del Coordinador del Área de Topografía y Transportes, Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila, al trabajo de graduación del estudiante Carlos René López Ruano, titulado **APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre de 2012.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS CON EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS PARA LA VOLADURA DE ROCA**, presentado por el estudiante universitario **Carlos René López Ruano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Reinos
Decano



Guatemala, 9 de octubre de 2012

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Quien me dio vida y me acompaña en cada paso.
Mis padres	René López Rodas y Berta Amalia Ruano Rodríguez, cuyas enseñanzas y apoyo incondicional han formado mi carácter y llenado mi vida de amor.
Mis hermanas	Bertha Marina, Ana Marcela y Amalia Paola, quienes siempre me han cuidado y apoyado.
Mis sobrinos	Erick y Jennifer cuyas sonrisas siempre me llenan de alegría.
Mis tíos	Miguel Ángel, Manuel de Jesús y José Luis, los cimientos sobre los cuales me levanto y a quienes agradeceré siempre su apoyo y cariño.
Mi ángel guardián	Concepción Gálvez de Girón, cuya mano me guio de niño y cuyo cariño me acompañará siempre.
Mi novia	Quien con sus consejos, cariño y apoyo llena de paz mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

- Mi asesor y mentor** Ing. Manuel de Jesús Ruano Rodríguez, quien ha sido un ejemplo de ética y excelencia, enseñándome día a día que la justicia, honestidad e imparcialidad deben ser valores de todo Ingeniero Civil.
- La empresa** SARUMAGA y a su gerente el señor Rudy Rosal, cuyas aportaciones fueron trascendentales para la elaboración del presente trabajo de graduación.
- La empresa** EQUIPSA, en especial al Ing. Mynor Rabre por compartir de manera profesional, conceptos y experiencias adquiridas a través de años de estudios y práctica, en el uso y manejo de explosivos comerciales.
- La empresa** MAYAQUIMICOS, quien a través del experto y especialista en explosivos el señor José Benavente, me instruyo sobre el uso y manejo seguro de explosivos para la voladura de roca.
- Facultad de Ingeniera** Que me formó y moldeó con el objetivo de convertirme en un profesional digno de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XVII
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. NOCIONES DE GEOLOGÍA EN LA VOLADURA DE ROCA	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Clasificación geológica de las rocas	4
1.2.1. Rocas ígneas	4
1.2.2. Rocas sedimentarias	5
1.2.3. Rocas metamórficas	7
1.3. Propiedades físicas de la roca	7
1.4. Estructura de la roca	9
1.4.1. Estratificación	9
1.4.2. Juntas	10
1.4.3. Fallas	10
1.4.4. Contactos	10
1.4.5. Otras estructuras de roca	10
2. LOS EXPLOSIVOS	13
2.1. Historia de los explosivos	13
2.2. Características y propiedades de los explosivos	17
2.2.1. Velocidad de detonación	18

2.2.2.	Densidad	20
2.2.3.	Presión de detonación	21
2.2.4.	Resistencia al agua	22
2.2.5.	Sensibilidad	24
2.2.6.	Humos	25
2.2.7.	Inflamabilidad	26
2.3.	Clasificación de los explosivos comerciales	27
2.3.1.	Dinamitas	29
2.3.1.1.	Dinamitas granulares corrientes	31
2.3.1.2.	Dinamitas amoniacaes granulares	32
2.3.1.3.	Dinamitas semi gelatinosas	32
2.3.1.4.	Dinamitas gelatinosas corrientes	33
2.3.1.5.	Dinamitas de gel amoniacaes o gelatinas tipo extra.....	33
2.3.2.	Hidrogeles / <i>Slurries</i>	33
2.3.3.	Explosivos en emulsión	35
2.3.4.	ANFO – <i>Prills</i> de voladura	38
2.3.4.1.	ANFO a granel.....	39
2.3.4.2.	ANFO envasado en bolsas de papel de varias capas.....	39
2.3.4.3.	ANFO en cartuchos cilíndricos.....	40
2.3.4.4.	ANFO pesado	40
2.3.5.	Mezclas	40
2.4.	Accesorios de iniciación	41
2.4.1.	Mecha de seguridad convencional y fulminantes para mecha	43
2.4.2.	Cordón detonante.....	44
2.4.3.	Encendedores de chispa o eléctricos	46
2.4.4.	Detonadores eléctricos.....	47

2.4.5	Detonadores de retardo no eléctricos	48
3.	MARCO LEGAL PARA EL USO DE EXPLOSIVOS EN GUATEMALA...	51
3.1	Leyes existentes	51
3.1.1.	Acuerdo Gubernativo No. 123-85 Ley de Especies Estancadas.....	51
3.1.2.	Acuerdo Gubernativo No. 14-74. Reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos	52
3.1.3.	Acuerdo Gubernativo No. 13-79. Modificación del capítulo VII del reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos	53
3.1.4.	Acuerdo Gubernativo No. 372-94, Modificación al artículo 50 del reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos.....	54
3.1.5.	Acuerdo Gubernativo No. 28-2004. Reglamento de actividad pirotécnica.....	54
3.2.	Dependencias estatales involucradas.....	54
3.3.	Permisos	55
3.4.	Almacenaje de explosivos y accesorios.....	56
4.	APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS	59
4.1.	Generalidades	59
4.2.	Descripción de zonas pobladas, arqueológicas, instalaciones en general o servicios, estructuras, flora y fauna	60
4.2.1.	Zonas pobladas	61
4.2.2.	Zonas arqueológicas.....	61

4.2.3.	Servicios.....	62
4.2.4.	Estructuras	62
4.2.5.	Flora y fauna	62
4.3.	Identificación de la voladura	64
4.4.	Identificación de la roca y estacionamientos	65
4.5.	Especificación de taludes	68
4.6.	Cortes a media ladera y trincheras.....	70
4.6.1.	Cortes a media ladera	71
4.6.2.	Cortes en trinchera	74
4.7.	Voladura para zanjas	76
4.8.	Voladura para eliminación de raíces y troncos	78
4.9.	Roca suelta de gran tamaño	79
5.	METODOLOGÍA DEL USO DE EXPLOSIVOS PARA LA APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS	81
5.1.	Barrenación y selección de equipo de perforación	81
5.1.1.	Selección de equipo de perforación.....	85
5.2.	Diseño de voladura	87
5.2.1.	Elementos para el diseño de voladura en bancos ..	87
5.2.1.1.	Dimensión de la voladura	88
5.2.1.2.	Parámetros dimensionales	89
5.2.1.3.	Cálculo y distribución de la carga explosiva.....	95
5.3.	Plantilla de barrenación o malla	103
5.4.	Circuitos de voladura.....	105
5.4.1.	Conexión en serie.....	105
5.4.2.	Conexión en paralelo.....	107
5.4.3.	Conexiones mixtas (serie-paralelo)	110
5.5.	Factores de carga según el tipo de roca.....	112

5.6.	Como elegir el explosivo adecuado	116
5.6.1.	Naturaleza y propiedades de la roca	116
5.6.2.	Diámetro y profundidad de los barrenos	116
5.6.3.	Humedad en los barrenos	117
5.6.4.	Toxicidad de los gases de explosión	117
5.6.5.	Naturaleza de la atmósfera	118
5.6.6.	Fragmentación	118
5.6.7.	Condiciones de seguridad intrínseca	118
5.6.8.	Factor económico	118
5.7.	Rendimiento y avance con explosivos	119
5.7.1.	Volumen de expansión.....	119
5.7.2.	Consumo específico de explosivos	120
5.7.3.	Condiciones para el trabajo eficiente de los explosivos	121
5.8.	Problemas posibles en la aplicación de explosivos.....	122
5.8.1.	Fallos en el disparo	122
5.8.2.	Proyecciones	123
5.8.3.	Vibraciones	124
5.8.4.	Ruidos	124
5.8.5.	Repiés	125
5.8.6.	Encendidos intempestivos	125
6.	VIBRACIONES GENERADAS POR LA DETONACIÓN DEL EXPLOSIVO.....	127
6.1.	Características.....	127
6.2.	Clasificación	128
6.2.1.	Ondas de cuerpo	129
6.2.2.	Ondas de superficie	129
6.3.	Controles de vibración y equipo.....	130

6.4.	Daños geotécnicos provocados por vibraciones.....	131
6.5	Evaluación post detonación.....	132
7.	PLANIFICACIÓN RENGLÓN EXTRACCIÓN ROCA CON EXPLOSIVOS.....	133
7.1.	Inspección ocular del proyecto	133
7.2.	Estudio tipográfico de los sitios diferentes de voladura	134
7.3.	Sub contratación de voladuras	135
7.4.	Programa para la ejecución de voladuras del proyecto	137
7.4.1.	Programa de tiro.....	138
7.4.1.1.	Elección del explosivo.....	138
7.4.1.2.	Accesorios de los explosivos	139
7.4.1.3.	Esquema geométrico	139
7.4.1.4.	Secuencia de encendido.....	140
7.4.1.5.	Tamaño de la voladura	140
7.4.2.	Programa de medidas de seguridad pre y post tiro	141
7.5.	Memoria de la voladura.....	141
7.6.	Medida y pago.....	142
8.	INTEGRACIÓN DEL PRECIO DE VOLADURA	145
8.1.	Generalidades.....	145
8.2.	Guía de renglones de trabajo	147
8.2.1.	Estimación del volumen de la voladura.....	147
8.2.2.	Diseño de voladura.....	148
8.2.3.	Perforación de barrenos	148
8.2.4.	Ejecución de la voladura.....	150
8.2.5.	Limpieza del área volada.....	151
8.3.	Secuencia de actividades de campo	151

8.3.1.	Perforación	151
8.3.1.1.	Amortización	152
8.3.1.2.	Intereses, seguros e impuestos.....	153
8.3.1.3.	Mantenimiento.....	153
8.3.1.4.	Mano de obra	154
8.3.1.5.	Energía	154
8.3.1.6.	Aceites y grasas	154
8.3.1.7.	Velocidad media.....	154
8.3.1.8.	Broca, estabilizador y barra.....	155
8.3.2.	Voladura primaria.....	156
8.3.3.	Voladura secundaria	158
8.3.3.1.	Barrenos levantadores	159
8.3.3.2.	Cargas externas	159
8.3.3.3.	Cargas internas.....	160
8.3.4.	Aflojamiento y fracturación de roca	160
8.4.	Costos directos e indirectos	162
8.4.1.	Generales	162
8.4.2.	<i>In situ</i> (en el sitio).....	163
8.4.3.	Modalidades de precio	164
8.5.	Modelo de presupuesto	165
9.	MEDIDAS DE SEGURIDAD ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA DETONACIÓN	169
9.1	Transporte, manipulación y almacenaje de los explosivos.....	169
9.1.1.	Transporte de explosivos y detonadores.....	170
9.1.2.	Almacenaje	170
9.2.	Medidas de seguridad en el momento de la detonación	171
9.3.	Recomendaciones de seguridad posteriores a la detonación.....	172

9.4.	Equipamiento de seguridad industrial.....	173
9.4.1.	Protecciones individuales	173
9.4.2.	Protecciones colectivas	174
CONCLUSIONES		177
RECOMENDACIONES		179
BIBLIOGRAFÍA		183

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo de formación de las rocas	3
2.	Clasificación de los explosivos químicos	28
3.	Esquema genérico de un iniciador	42
4.	Detonador eléctrico	47
5.	Detonador de manguerita nonel	48
6.	Taludes típicos en obras de carretera para cortes en roca.....	69
7.	Perfiles típicos para cortes a media ladera.....	72
8.	Trazos para cortes en trincheras viales.....	76
9.	Excavación de una zanja mediante voladura	77
10.	Métodos para eliminación de raíces y troncos.....	78
11.	Unidades de perforación para métodos rotopercutivos, a) martillo en cabeza, b) martillo de fondo	82
12.	Perforación con métodos rotativos, brocas triturantes y cortantes.....	83
13.	Equipos y accesorios de perforación, a) compresor portátil, b) perforadora hidráulica, c) juego de brocas, d) martillo manual, e) varillas o barras.....	84
14.	Parámetros dimensionales en banco de voladura	94
15.	Distribución de carga explosiva, a) distribución de carga dentro del barreno, b) plantilla o malla de barrenación.....	102
16.	Plantillas de perforación	103
17.	Mallas de salida	104
18.	Conexión en serie de barrenos	106
19.	Conexión en paralelo de barrenos	108

20.	Conexión mixta de barrenos	110
21.	Fases de ruptura	113
22.	Propiedades de explosivos según el tipo de roca	114
23.	Ciclo del esquema básico de planificación.....	137

TABLAS

I.	Resistencia tensional y compresional de diferentes rocas	8
II.	Velocidad de detonación (m/s)	19
III.	Densidad típica de explosivos comerciales.....	20
IV.	Presión de detonación de algunos explosivos comerciales	21
V.	Tolerancia al contacto con el agua sin deterioro	22
VI.	Resistencia al agua	23
VII.	Sensibilidad (diámetro crítico).....	24
VIII.	Clasificación de humos del Instituto de Fabricantes de Explosivos en Estados Unidos IME	26
IX.	Resistencia a la temperatura	27
X.	Propiedades de dinamitas típicas	30
XI.	Propiedades generales de algunos explosivos en hidrogel.....	35
XII.	Propiedades generales de algunos explosivos en emulsión	36
XIII.	Cordones detonantes con PETN	45
XIV.	Clasificación de rocas por su dureza relativa escala de Protodiakonov	66
XV.	Clasificación generalizada de rocas para voladura	67
XVI.	Parámetros de barreno en equivalencia de diámetro.....	71
XVII.	Intervalo de diámetros de perforación según su aplicación.....	86
XVIII.	Factores de carga según el tipo de roca.....	115
XIX.	Consumos específicos.....	121

XX.	Modelo de presupuesto perforación de barrenos para voladura de roca en la apertura y ampliación de carreteras.....	165
XXI.	Modelo de presupuesto ejecución voladura de roca en la apertura y ampliación de carreteras	167

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HMX	Alto de fusión explosiva
H	Altura de banco (m)
Amp	Amperios
A	Ancho de banco (m)
α	Ángulo con respecto a la vertical ($^{\circ}$)
B	Burden o Bordo (m)
CC	Carga de columna del barreno (kg/m)
CF	Carga de fondo del barreno (kg/m)
CE	Carga específica de explosivo (kg/m^3)
Q	Carga total de explosivo por barreno (kg)
cm	Centímetro
AC	Corriente alterna (Amp)
I_i	Corriente de encendido (Amp)
DC	Corriente directa (Amp)
Ca	Costo de amortización (Qtz/hrs)
Cb	Costo de broca, estabilizador y barra (Qtz/m)
Ce	Costo de energía (Qtz/hrs)
Cl	Costo de engrase y lubricación (Qtz/hrs)
Ci	Costo de intereses y seguros (Qtz/hrs)
Cm	Costo de mantenimiento (Qtz/hrs)
Ct	Costo de perforación (Qtz/m)
Co	Costo mano de obra (Qtz/hrs)
ρ	Densidad (kg/m^3)

ρ_e	Densidad del explosivo (gr/cm ³)
ρ_r	Densidad relativa (kg/m ³)
\emptyset_b	Diámetro del barreno (mm)
D	Diámetro del explosivo (mm)
E	Espaciamiento (m)
Gpa	Giga pascales (1x10 ⁹ Newton/m ²)
°	Grados
°C	Grados Celsius
gr	Gramos
gr/cm³	Gramos por centímetros cúbicos
gr/m	Gramos por metro
gr/p	Gramos por pie
hrs	Horas
I	Intensidad total de salida (Amp)
kbar	Kilobar
kg	Kilogramo
kg/m-s²	Kilogramos metros por segundo al cuadrado
kg/m³	Kilogramos por metros cúbicos
km	Kilometro
lb	Libra
psi	Libras por pulgadas cuadradas
L	Longitud del barreno (m)
Mpa	Mega pascales (1x10 ⁶ Newton/m ²)
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
Lmin	Mínima longitud de barrenos (m)

N/m	Newton por metros cuadrados
ANFO	Nitrato de amonio y combustible diesel
n	Número de años de vida útil
N	Número de detonadores
Ω	Ohmios
LOX	Oxígeno líquido y carbón
pa	pascales (Newton/m ²)
PENT	Pentaeritritol Tetranitrato o Pentrita
We	Peso del explosivo (kg)
p/s	Pie por segundo
%	Porcentaje
Plg	Pulgadas
Qtz	Quetzales
R_D	Resistencia de cada detonador (Ohmios)
R_L	Resistencia de la línea de tiro (Ohmios)
R_p	Resistencia media del puente del detonador empleado (Ohmios)
R	Resistencia total de la voladura (Ohmios)
r.p.m	Revoluciones por minuto
SP	Sobre perforación (m)
T	Taco (m)
Ton/m³	Tonelada por metro cúbico
TNT	Trinitrotolueno
VPP	Velocidad de partícula (m/s)
V_p	Velocidad de penetración del barreno (m/hrs)
Vm	Velocidad de perforación media (m/hrs)
Nr	Velocidad de rotación (r.p.m)
V	Volumen (m ³)
Ve	Volumen de explosivo (cm ³)

GLOSARIO

Altos explosivos	Explosivos que se caracterizan por su alto nivel de reacción, desarrollo de alta presión y por la presencia de una onda de detonación en el explosivo.
ANFO	Agente de voladura que no contiene más ingredientes esenciales que nitrato de amonio en <i>prills</i> y aceite combustible.
Bajos explosivos	Explosivos que se caracterizan por la deflagración o por tener una baja tasa de reacción y por el desarrollo de una presión baja.
Balizamiento	Conjunto de señales fijas o móviles, utilizadas para indicar un área o lugar de peligro potencial.
Barreno	Agujero perforado en el material que se va romper con el fin de contener una carga explosiva, también llamado taladro o perforación.
Booster	Carga explosiva, usualmente con velocidad de detonación y presión de detonación altas, diseñada para uso en la secuencia de iniciación de los explosivos entre un iniciador, o cebo, y la carga principal.

Bordo o Burden	La distancia desde un barreno a la cara libre mas cercana; o la distancia entre barrenos medida de manera perpendicular al espaciamento.
Cara libre	Superficie de roca expuesta al aire o al agua que brinda un espacio para la expansión luego de producirse la fragmentación; a veces se le llama cara abierta.
Carga de columna	Carga de explosivos en un barreno en forma de una columna continúa y larga.
Cebo	Unidad, paquete o cartucho de explosivo que se emplea para iniciar otros explosivos o agentes de voladura, y que contiene: (1) un detonador; o (2) un cordón detonante al que se adjunta un detonador diseñado para iniciar dicho cordón detonante.
Circuito en serie	Circuito de voladura eléctrica que brinda una ruta continua para la corriente a través de todos los detonadores en el circuito.
Circuito paralelo	Circuito de voladura eléctrica en el que un alambre de cada detonador se conecta a uno de los alambres de la fuente de corriente del disparo, y el otro alambre de cada detonador se conecta al otro alambre de la misma fuente de corriente del disparo.

Cordón detonante	Cordón flexible que contiene un núcleo central de un alto explosivo que se puede emplear para iniciar otros altos explosivos.
Deflagración	Reacción explosiva, como la de una combustión rápida, que se mueve a través de un material explosivo a una velocidad menor que la velocidad del sonido en dicho material.
Detonación	Reacción explosiva que se traslada a través de un material explosivo a una velocidad mayor que la velocidad del sonido en dicho material.
Emulsión	Material explosivo que contiene cantidades sustanciales de oxidantes disueltos en gotitas de agua, rodeadas de un combustible no miscible, o gotitas de un combustible no miscible rodeado de agua que contiene cantidades sustanciales de oxidantes.
Espaciamiento	La distancia entre taladros. En la voladura de banco, la distancia se mide paralela ala cara libre y perpendicular al bordo.
Experto en explosivos	Especialista en voladura certificado por una agencia gubernamental para preparar, ejecuta y supervisar una voladura.

Fragmentación	El rompimiento de una masa solida en pedazos, por efecto de una voladura.
Humos	Los productos gaseosos de una explosión. En la determinación de la clase de humos de los explosivos, solo se consideran los gases tóxicos o venenosos.
IDAEH	Instituto de Antropología e Historia de Guatemala.
IME	Instituto de Fabricantes de Explosivos E.E.U.U.
Inflamabilidad	La facilidad con la que un explosivo se puede iniciar por efecto de una llama o calor.
Memoria de voladura	Registro escrito con información sobre una voladura específica, según lo requiera la ley o reglamento.
Nitrato de amonio	La sal de amonio del acido nítrico representada por la fórmula NH_4NO_3 .
Onda de choque	Pulso de presión transiental que se propaga a una velocidad supersónica.
Plantilla de barrenación	El plano o disposición de los barrenos que se requieren para la voladura; expresión de la distancia del bordo y el espaciamiento y su relación entre si.

Potencia del explosivo	La cantidad de energía liberada por un explosivo al momento de la detonación, lo cual es una indicación de la capacidad del explosivo para realizar el trabajo.
Propagación	La detonación de una carga explosiva por un impulso recibido desde una carga explosiva cercana o contigua.
Rotura	Termino empleado para describir la distribución en el lugar de los fragmentos de roca credos por la voladura.
Sensibilidad	Medida de la habilidad de propagación de un explosivo, bajo ciertas condiciones de prueba.
Slurry	Material explosivo que contiene una porción importante de un líquido, oxidante y combustible, además de un espesante.
Sobre perforación	La práctica de perforar barrenos por debajo del nivel del suelo, o elevación donde se trabaja, para garantizar la rotura de la roca hasta la elevación del área de trabajo.
Taco	Carga explosiva que se separa de otras cargas en el barreno por medio de un taco de contención o un cojín de aire.

Taqueo	La acción de compactar la carga explosiva o el taco de contención de un barreno. A veces se refiere al material de contención en si.
Velocidad de detonación	La velocidad a la cual una detonación progresa a través de un explosivo.
Vibraciones de voladura	La energía de una voladura que se manifiesta en vibraciones que se transmiten a través de la tierra, fuera del área de voladura inmediata.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación describe a los materiales explosivos como medios que el ingeniero civil puede utilizar para el desarrollo de proyectos de apertura y ampliación de carreteras. En Guatemala se construyen carreteras en regiones montañosas, donde es requerida la extracción de grandes volúmenes de roca con el uso de explosivos comerciales.

El primer capítulo describe generalidades geológicas, siendo la información geológica del sitio de voladura, el punto de partida para un diseño adaptado a las diferentes condiciones impuestas por las características de estrato rocoso a romper.

El segundo capítulo aborda el tema de los explosivos y accesorios de los mismos, presentándolos no mas que como un material, que permite dadas sus características y propiedades, la liberación de energía necesaria para fragmentación de la roca.

El uso y manejo de explosivos comerciales, esta regulado por el Ministerio de la Defensa de Guatemala, diferentes leyes y reglamentos enlistados en el capítulo tres forman el marco legal que permite la utilización de explosivos para uso civil.

En el capítulo cuatro se describen diferentes metodologías aplicadas en carreteras, para el aflojamiento y ruptura de roca con el uso de explosivos, así también en el capítulo cinco se presentan los diferentes parámetros que permiten diseños eficientes de voladura.

Dada la liberación de energía por la detonación del explosivo, se generan vibraciones a nivel geotécnico descritas en el capítulo seis.

La planificación e integración del precio para el renglón extracción roca con explosivos, se aborda en el capítulo siete y ocho, respectivamente, con el fin de brindar parámetros para la cuantificación de trabajos de voladura.

Finalmente el capítulo nueve abarca las medidas de seguridad necesarias para el manejo, almacenamiento y uso de material explosivo, utilizado para la fragmentación de roca.

OBJETIVOS

General

Elaborar una herramienta de consulta para que ingenieros civiles puedan realizar actividades tales como el diseño, planificación, supervisión y monitoreo eficiente de voladura de roca con el uso y manejo de explosivos, tanto en apertura como en aplicación de carreteras.

Específicos

1. Identificar las condiciones geológicas que hacen necesaria la utilización de explosivos comerciales como medio para la apertura y ampliación de carreteras.
2. Describir los diferentes tipos de explosivos comerciales y dispositivos de iniciación utilizados en la voladura de roca.
3. Determinar los factores que intervienen en el diseño de la voladura de roca y metodologías utilizadas para el uso y manejo de explosivos comerciales.
4. Clasificar las vibraciones y efecto de las mismas en los suelos, provocadas por el uso de explosivos.
5. Conocer los diferentes renglones de trabajo para el uso y manejo de explosivos comerciales en la voladura de roca para proyectos viales.

6. Conocer las medidas de seguridad para obras viales, necesarias en el uso y manejo de explosivos comerciales.

INTRODUCCIÓN

Gran parte de la geografía nacional es montañosa, actualmente se ejecutan proyectos de apertura o aplicación de carreteras, en los cuales una de las primeras etapas de trabajo, es el movimiento de material, que dada su dureza, requiere la utilización de explosivos comerciales para el aflojamiento y ruptura de macizos rocosos.

En la apertura y ampliación de proyectos viales deben tomarse en cuenta condiciones geológicas de la región, determinantes en la metodología a utilizar para el diseño de voladuras; métodos y equipo para perforación, tipo de explosivo comercial y accesorios de iniciación a utilizar.

Los sitios en donde será necesaria la utilización de explosivos deben identificarse y las voladuras deben sujetarse al programa general de voladuras, para que el contratista, supervisora, empresa subcontratada y/o en experto en explosivos, resulten satisfechos con el trabajo realizado.

Un ingeniero civil debe poseer los conocimientos técnicos y científicos suficientes y necesarios, para la planificación, diseño y supervisión eficiente de voladura de roca con el uso y manejo de explosivos comerciales, dado que es el encargado y responsable del diseño de proyectos viales.

1. NOCIONES DE GEOLOGÍA EN LA VOLADURA DE ROCA

1.1. Generalidades

La geología es la ciencia que estudia la materia física y energía constituyentes de la Tierra. El campo de la geología comprende el estudio de la composición, estructura, propiedades y la historia de la materia física del planeta así como los procesos por los que se forma.

La corteza Terrestre fue, en su etapa inicial, una costra líquido viscosa, que endureciéndose lentamente se convirtió en roca ígnea. La corteza esta aumentado todavía por el magma que ocasionalmente fluye o rebosa desde las profundidades de la Tierra.

El proceso de la meteorización, agravado por los plegamientos y agrietamientos de la corteza, ataca las rocas, produciendo suelos residuales, productos de la descomposición, solución y desintegración local. Algunos de estos materiales son transportados por gravedad deslizándose y arrastrándose para formar depósitos en lugares cercanos; otros son trasportados por el viento o el agua, a lugares más lejanos. Estos materiales se mezclan, agrupándose por tamaños, y asentándose en otros lugares para formar los suelos depositados o sedimentarios.

La meteorización continúa en los suelos sedimentarios, y algunos son retransportados y depositados, constituyendo nuevas formaciones. Otros llegan a endurecerse por consolidación y cementación, formando rocas sedimentarias.

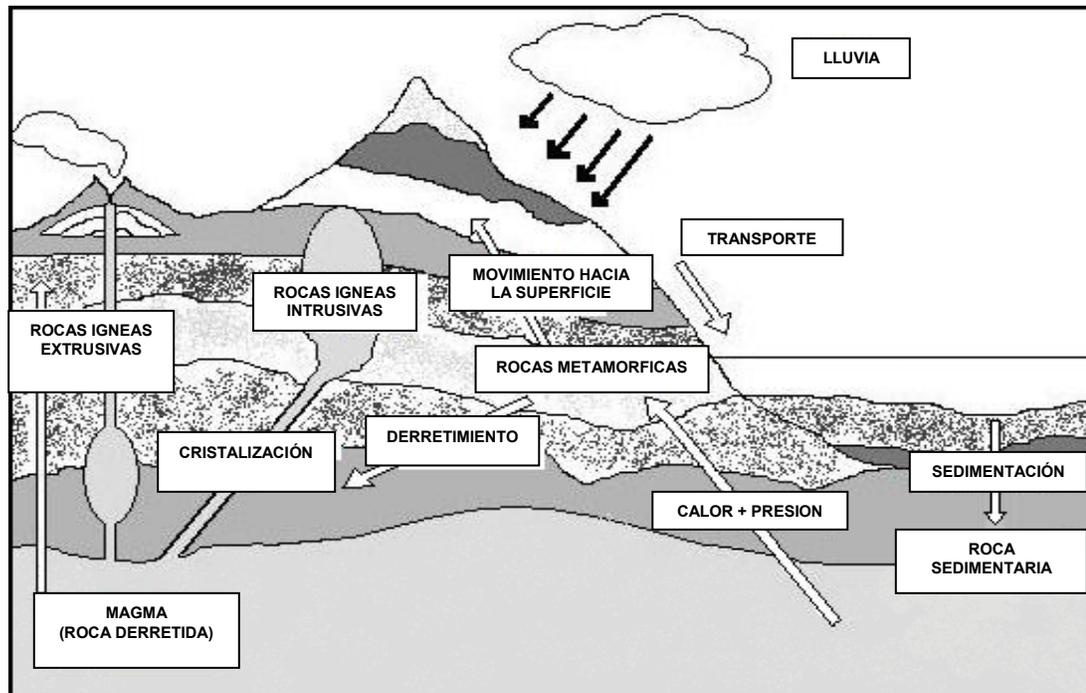
Las rocas sedimentarias están sometidas a las mismas deformaciones y fracturas producidas por los movimientos tectónicos, que las rocas ígneas. Los cambios ambientales pueden igualmente someter a estas rocas a una meteorización en el propio lugar, lo que produce nuevos suelos residuales, seguidos a su vez por procesos de erosión y transporte, que con el tiempo crean nuevos suelos depositados.

En vez de quedar expuestas a la meteorización y erosión, las rocas sedimentarias pueden quedar enterradas debajo de sedimentos que se han acumulado y ser sometidas a calor creciente, presión y fuerza cortante. Los minerales se alteran químicamente y se distorsionan o realinean físicamente para producir rocas metamórficas. Las nuevas rocas pueden parecerse a las progenitoras, pero por lo general, son más cristalinas, densas y duras. Las rocas metamórficas también sufren los efectos de la meteorización cuando quedan expuestas y forman suelos residuales, que algunas veces son transportados y mezclados para formar nuevos depósitos sedimentarios.

Las rocas ígneas también pueden ser metamorfoseadas por el calor, la presión y la fuerza cortante, pero por lo general, los cambios son menos drásticos.

Y finalmente, las rocas metamórficas pueden volver a transformarse en rocas ígneas por el calor, la presión y la adición de nuevos minerales provenientes de las masas fundidas inferiores. El ciclo es un flujo constante, es continuo y sin puntos definidos de comienzo y fin (figura 1).

Figura 1. **Ciclo de formación de las rocas**



Fuente: elaboración propia.

La ingeniería es solo un proceso más que se suma al ciclo, siendo localmente drástico. Por lo tanto todo trabajo relacionado con la tierra debe ser valorado por el impacto total que pueda producir en este proceso constante de transformación.

La geología de un área de voladura tradicionalmente se describe como un factor fijo, sin embargo hasta cierto punto es variable en aquellos casos en donde es posible reorientar la cara para disparar en una dirección más favorable. Dado que es difícil hacer algo acerca de la ubicación u orientación del área de voladura, es evidente que el factor de mayor influencia en la voladura es a geología.

En voladuras, reconocer que la estructura geológica de las formaciones rocosas varían enormemente, es de suma importancia; esta variabilidad tiene un efecto profundo en el éxito o fracaso de una operación de voladura.

1.2. Clasificación geológica de las rocas

Es indispensable ser capaz de identificar y describir de manera correcta los diferentes tipos de roca, de manera que los efectos del diseño de voladura de un lugar en particular puedan ser analizados y alterados apropiadamente, pudiendo adaptarse a las características geológicas específicas de otro. Una forma de describir las rocas es a través de su clasificación geológica.

1.2.1. Rocas ígneas

Proceden del manto o del núcleo; han sido expulsadas hacia afuera, aprovechando alguna grieta o parte débil en la corteza, en forma líquida y a causa de las grandes presiones y enormes temperaturas que a esas profundidades existen. Por lo menos en la corteza terrestre, el gradiente térmico aumenta en términos generales a razón de 1 grado Celsius por cada 33 metros de profundidad.

Hay dos formas primarias de estructura en las rocas ígneas: masiva o intrusiva y extrusiva.

La forma intrusiva comprende masas regionales, estas rocas son de grano grueso (macro granulada) debido al lento enfriamiento de grandes volúmenes de magma plástico o fundido, siendo estas: Granito, Sienita, Diorita, Gabro y Peridotita. Las rocas intrusivas se forman en la superficie de la tierra por corrientes de magma o por erupción volcánica. Estas corrientes pueden formar

estratos uniformes que cubren grandes áreas u ondulaciones irregulares de bloques poroso y vidriosos. Las rocas extrusivas son generalmente de grano muy fino (micro granulada) debido a su rápido enfriamiento, siendo estas: Riolita, Traquita, Andesita, Basalto y Picrita.

Las grandes masas extrusivas son más bien homogéneas. Las masas intrusivas más pequeñas, y las extrusivas y los límites de las grandes masas intrusivas presentan numerosas discontinuidades. Las grietas de las juntas que se forman por enfriamiento y flexión dividen las grandes masas en bloques o primas de distintos tamaños, debilitándolas.

Bloques de rocas más antiguas se encuentran frecuentemente sumidos en la superficie de masas intrusivas. Cuando estas rocas quedan expuestas en la superficie del terreno sufren exfoliaciones o desbastes formando toscas cubiertas en forma de cúpula de varios centímetros de espesor con pequeños vanos en la parte inferior. Las grietas de las juntas y las de fuerzas cortantes debidas a actividad tectónica, y de bolsones de gas en las masas extrusivas facilitan el paso a las filtraciones, acelerando la meteorización desde el interior de la masa.

1.2.2. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias son las que se formaron por la acumulación de sedimentos que se consolidaron en rocas duras, firmes, estratificadas. Los sedimentos pueden estar integrados por fragmentos de roca de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de acción química, de evaporación o mezclas de estos.

Los procesos de endurecimiento como los esfuerzos laterales causados por los movimientos tectónicos consolidan los granos para formar una estructura más densa. La presión también puede aumentar la atracción entre partículas. La cementación es el más importante mecanismo del endurecimiento. El grado de endurecimiento depende de la cantidad y tipo de cementante así como del modo en que dicho agente haya sido precipitado.

Las rocas sedimentarias suelen dividirse en silíceas, arcillosas, calizas, se incluyen en este grupo a las dolomitas y rocas salinas.

Las rocas sedimentarias silíceas pueden ser blandas y aglomeradas, que corresponden con las arenas y se encuentran representadas especialmente por las areniscas, cuyo cemento puede ser silíceo, arcilloso o calizo.

Las rocas sedimentarias arcillosas son de grano muy fino que contienen, al menos, un 50 por ciento de minerales arcillosos, a los que se pueden añadir varios minerales, resultando composiciones muy diversas, se forman por una acumulación de láminas de partículas microscópicas, compuestas de sílice y de aluminio, elementos que vienen a su vez de la alteración de rocas ígneas y metamórficas. Se puede mencionar al caolín como un ejemplo de roca sedimentaria arcillosa, pues, esta compuesta de arcilla casi pura.

Las rocas sedimentarias calizas y dolomitas pueden ser de origen químico u orgánico, se encuentran en una amplia variedad de formas y grados de endurecimiento, de acuerdo con el modo en que fueron depositadas y su historia. Las calizas y dolomíticas son depositadas frecuentemente con otros sedimentos generalmente arcillas. Estos sedimentos pueden mezclarse, como en las calizas arcillosas, o intercalarse en los estratos como vetas alteras de pizarra sedimentaria.

Las rocas debidas a depósitos químicos y que no entran en ninguna categoría anterior son llamadas rocas sedimentarias salinas y las principales son: la sal gema, el yeso y la anhidrita.

1.2.3. Rocas metamórficas

Después de su formación las rocas sufren diversas clases de alteraciones o modificaciones, tanto en su estructura como en su composición. Estas modificaciones son ocasionadas por agentes geológicos tales como la inyección de rocas ígneas o la infiltración de aguas minerales. Las rocas metamórficas son cristalinas, como las rocas ígneas; estratificadas como las rocas sedimentarias. Las principales rocas metamórficas son: gneis, mica, esquisto y leptinita.

1.3. Propiedades físicas de la roca

Una manera de describir las rocas es comparar características específicas, medidas en ejemplares de rocas. Las propiedades de la roca suelen ser difíciles de correlacionar con las actividades de voladura, pero es una opción como método útil para comparar diferentes tipos de roca.

- Resistencia compresional: es la tensión compresional máxima que se puede aplicar a un material como la roca, bajo condiciones dadas, antes de que se quiebre, expresado en Newtons sobre metro cuadrado (N/m^2) también llamado Pascales (Pa) por el Sistema Internacional de Medidas.
- Resistencia tensional: es la resistencia tensional máxima aplicada que un cuerpo puede resistir. La resistencia tensional de una roca es mucho menor que sus resistencia compresional. Es más fácil romper una roca por

distensión que por presión, expresado en Newtons sobre metro cuadrado (N/m^2) o Pascales (Pa) por el Sistema Internacional de Medidas.

- Gravedad específica: es la razón de la masa de un volumen dado de roca. Es igual a la densidad, la densidad se da en kilogramos sobre metros cúbicos (kg/m^3) así como gramo sobre centímetro cubico (gr/cm^3) por el Sistema Internacional de Medidas.
- Velocidad de onda longitudinal: es la velocidad da la cual la roca transmitirá las ondas de compresión. A mayor velocidad de la roca, mayor será la velocidad del explosivo requerido para romperla, se expresa en metros sobre segundo (m/s) por el Sistema Internacional de Medidas.

Tabla I. **Resistencia tensional y compresional de diferentes rocas**

Muestra de Roca	Resistencias Compresionales		Resistencia Tensional	
	Mega Pascales (MPa)	Libras sobre Pulgadas cuadradas (psi)	Mega Pascales (MPa)	Libras sobre Pulgadas cuadradas (psi)
Granito	196 - 350	28 400 – 51 000	9,6 – 29,6	1 400 – 4 300
Diabasa	283 - 393	41 100 – 57 000	18,6 – 29,6	2 700 – 4 300
Mármol	147 - 186	21 300 – 27 000	14,5 – 19,3	2 100 – 2 800
Piedra Caliza	128 - 196	18 500 – 28 400	16,5 – 29,6	2 400 – 4 300
Arenisca	Aprox. 293	Aprox. 42 500	Aprox. 29,6	Aprox. 4 300

Fuente: OLOFSSON, Stig O. Tecnología de los Explosivos Aplicada a la Construcción y Minería. p. 256

En la tabla I se enlistan valores de las propiedades típicas de algunas muestras de roca, pudiendo estos valores ser considerados para el diseño de voladura. Es importante realizar ensayos a las muestras de rocas extraídas del sitio donde se realizara la voladura, dichos ensayos son realizados por profesionales en Geología; Geólogos y/o Maestros en Geotecnia.

1.4. Estructura de la roca

La estructura de la roca esta dada por las características producidas en ella por movimientos durante y después de su formación. El estudio en campo de las estructuras de la roca mejorara el rendimiento de la voladura. La estratificación, las juntas, las fallas y los contactos son ejemplos de estas estructuras.

1.4.1. Estratificación

La estratificación es la sucesión de capas o planos que dividen la roca sedimentaria y por lo general una propiedad útil relacionada a la voladura cuando:

- Los estratos están pegados entre si, de modo que no permiten la fuga de energía de los explosivos.
- Cuando los estratos se organizan en capas cercanas, que se aproximan al tamaño de fragmentación deseado.

También a estratificación puede indirectamente describir estructura que se encuentran en rocas metamórficas o ígneas, con una tendencia a separarse mas o menos en línea paralelas entre si.

1.4.2. Juntas

Las juntas son grietas o fracturas en la roca sin ningún desplazamiento asociado.

El espacio entre las juntas brinda una idea en tamaño del fragmento de roca que puede obtenerse al realizar la voladura, específicamente en áreas donde no hay distribución de energía de explosivos, y si la hay es deficiente.

1.4.3. Fallas

Las fallas, como la juntas, pueden disminuir los índices de penetración de la perforadora haciendo que las brocas y el barreno de esta se desvíen o se atasquen en el taladro, sin embargo a diferencia de la juntas, las fallas son fracturas con movimiento subsecuente de roca, en uno o ambos lados de la zona de fractura.

1.4.4. Contactos

Los lugares o superficies en donde dos o más tipos de rocas se encuentran son llamados contactos, estos afectaran enormemente la implementación de la perforadora y la voladura, si existe un contacto entre rocas con características diferentes.

1.4.5. Otras estructuras de roca

Algunos tipos de estructuras de roca poseen características porosas tales como espacios abiertos, zonas de alteración, burbujas de gas, huecos o vacíos, este es el caso de algunos tipos de piedra caliza, afectando directamente el

confinamiento de la energía del explosivo dando lugar a la sobrepresión de aire, piedras volantes y fragmentación sobredimensionada.

También debe de tomarse en cuenta la condición de temperatura al planear disparos en ciertos ambientes geológicos. Las temperaturas de tierra extremadamente altas, afectan la seguridad de una operación de voladura. Esta condición puede provocar detonaciones prematuras o fallas del producto, así también como taladros calientes.

2. LOS EXPLOSIVOS

2.1. Historia de los explosivos

Los explosivos comerciales empleados en apertura y ampliación de carreteras y otras aplicaciones pacíficas similares han ejercido una enorme influencia en la infraestructura vial del presente. Existen obras viales las cuales habrían sido imposibles de desarrollar sin la ayuda de los explosivos.

Los explosivos comerciales de hoy tienen su origen en el descubrimiento y desarrollo de la pólvora negra, su principal ingrediente es el salitre (nitrato de potasio) o nitro documentado en escritos del autor árabe Abd Allah que se remontan al siglo XIII. Sin embargo, se cree que los chinos ya habían empleado salitre, tal vez desde el siglo X, pero solo para uso pirotécnico.

La pólvora se considero un agente de voladura hasta después de 1242, cuando el freile inglés Rogel Bacon publicó una fórmula para la elaboración de pólvora negra. En 1804, *Eleuthère Irénée du Pont de Nemours Company (E.I. duPont)* desarrollo en 1857 un modo de sustituir el nitrato de potasio por otro producto menos costoso: el nitrato de sodio, lo cual hizo que el empleo de pólvora negra resultara más económico.

La nitroglicerina fue descubierta por Ascanio Sobrero en 1846. Sin embargo fue Alfred Nobel quien concluyo que, a diferencia de la pólvora negra, la nitroglicerina requería de una onda fuerte para que pudiera iniciar de manera confiable. Conduciendo a lo que llego a ser probablemente su principal invento: el fulminante.

El trabajo previo de Alfred Nobel con el *Kieselguhr* (diatomita, piedra podrida o trípoli) como material de empaquetado condujo a su selección como el absorbente de su elección. Una producción de tres partes de nitroglicerina con una parte de *kieselguhr* demostró ser exitosa en la práctica y, en 1867, dicha combinación se introdujo al mercado como dinamita. En 1903 se fabricó la primera dinamita en Latinoamérica, precisamente en el poblado de Dinamita, Durango, México,

En 1917 el Buro de Minería de los Estados Unidos inicio una investigación sobre el uso potencial del explosivo de oxígeno líquido (LOX, por sus siglas en inglés), el cual consistía en materiales carbonosos saturados en oxígeno líquido. La desaparición de los explosivos de oxígeno líquido se aceleró con la introducción de los agentes de voladura modernos hechos a base de nitrato de amonio.

Se empezaron a utilizar en 1955 gránulos de nitrato de amonio mezclados con combustible diesel común No. 2, adoptándose para esta mezcla el nombre de ANFO.

Combinando ácido nítrico con carbonato de amonio, J.R Glauber fue el primero en sintetizar el nitrato de amonio en 1659, bautizándolo con el nombre de *nitrum flammans* (sodio flameante), en la actualidad constituye el ingrediente básico de muchos explosivos comerciales, en donde cumple la función de oxidante.

En la actualidad el nitrato de amonio tiene dos usos diferentes: 1) es un fertilizante importante en la industria agrícola; y 2) constituye el ingrediente básico de muchos explosivos comerciales, en donde cumple la función de oxidante.

El ANFO convertido en un agente de voladura de bajo costo en relación a su capacidad de rompimiento de roca por su producción de un gran volumen de gas, pero sin embargo debido a que este no podía ser usado en condiciones con presencia de agua sin ser primero encartuchado o colocado en mangas plásticas, genero la iniciativa del Dr. Melvin A. Cook, que después, de varios experimentos presentó el explosivo llamado *Slurry* (mezcla) o Hidrogel, resistente al agua, de alta densidad y con una velocidad de detonación relativamente alta.

En 1964 se dio el surgimiento de la sensibilización por la saturación de gases químicos, concepto fundamental para la siguiente generación de explosivos, las emulsiones, cuya estructura de agua en aceite tiene resistencia al agua casi perfecta.

Un explosivo en emulsión consiste en gotitas sub-microscópicas de una solución oxidante en una matriz continua de combustible, las primeras emulsiones datan de mediados de la década de los 60's, pero su comercialización no empezó sino hasta finales de la década de los 70's.

La historia de los explosivos esta ligada a la de sus dispositivos de iniciación, en 1831, William Bickford, en Inglaterra, invento lo que hoy en día se conoce como mecha de seguridad convencional, reduciéndose así los accidentes en las operaciones de voladura. Nobel unió su detonador eléctrico a la mecha de seguridad convencional y logro convertir a la nitroglicerina en un explosivo útil, abriendo el camino para el desarrollo de la dinamita.

Hacia 1830, se desarrollaron detonadores que utilizaban alambres con secciones estriadas hasta alcanzar diámetros muy delgados para crear calor, debido a la gran resistencia de dicha área originándose el concepto de alambre puente.

El cordón detonante se dio luego del desarrollo de la mecha de seguridad convencional, en operaciones de voladura no eléctrica. El cordón detonante moderno, que consiste en Pentaeritrol Tetranitrato, también conocido como Pentrita (PETN) envuelto en una tela trenzada, fue introducido en 1938.

Los conectores de retardo se introdujeron a principios de la década de los 50's, los mismos tenían un trozo pequeño de condón en ambos extremos de un elemento de retardo encerrado en una capsula de metal.

Relativo a los detonadores de retardo no electricos, en 1967 se introdujo en los Estados Unidos un sistema compuesto por un cordón detonante de núcleo mínimo unido a un detonador de retardo; de manera casi simultanea, se introducía en Suecia un sistema compuesto por una manguerita nonel la cual consistía en un tubo plástico con una recubierta interna de aluminio, muy delgada y el explosivo alto de fusión explosiva (*High Melting eXplosive*) HMX por sus siglas en inglés, unido a un detonador de retardo, su inventor fue el Dr. Per Anders Persson.

En la actualidad la tecnología relacionada con los explosivos con fines constructivos avanza y sigue en busca de sistemas más eficientes de trabajo.

2.2. Características y propiedades de los explosivos

En las operaciones de voladura comercial aplicada en la ampliación y apertura de carreteras, la energía liberada por la detonación de los explosivos produce cuatro efectos básicos: la fragmentación de la roca, el desplazamiento de la roca, la vibración del terreno y sobrepresión de aire; además cierta cantidad de humos tóxicos y no tóxicos. Estos efectos son alterados directamente por las características y propiedades que posea el explosivo utilizado. Deberá escogerse el mejor tipo de explosivo para una situación específica de voladura.

Un alto explosivo reúne tres características básicas:

- Es un compuesto o mezcla química que se inicia por calor, choque, impacto, fricción, o una combinación de estas condiciones.
- Cuando se inicia mediante un detonador o *booster*, se descompone rápidamente generando una detonación.
- Con la detonación se produce una liberación rápida de calor y grandes cantidades de gases de alta presión, los que se expanden rápidamente con la potencia suficiente para vencer fuerzas de confinamiento.

Una detonación es un tipo específico de explosión que consiste en una reacción exotérmica la cual es iniciada y propagada por una onda de choque. Todos los explosivos tiene la habilidad de reaccionar químicamente al calor para producir calor (reacción exotérmica), así como otras sustancias mayormente gaseosas, resultantes de dicha reacción.

Así como características todos los explosivos tienen también propiedades individuales, cada una de ellas es muy importante y requiere ser evaluada para determinar la utilidad potencial de un tipo de explosivo para una aplicación específica.

2.2.1. Velocidad de detonación

Es la velocidad a la que la reacción de detonación se extiende a través de la columna de explosivos. Para que un explosivo sea de utilidad esta velocidad deberá ser igual o mayor a la velocidad sónica de la roca a explotar. Por definición, esta velocidad supera la velocidad del sonido. La velocidad de detonación se mide en metros sobre segundo (m/s) y muchos factores la afectan incluyendo: tipo de explosivo, densidad del explosivo, el diámetro de columna de explosivos, el confinamiento, la temperatura y el cebado. Se puede describir la manera en que estos factores intervienen en el desarrollo de la velocidad máxima o ideal de un explosivo de la siguiente manera:

- Para una densidad dada, la velocidad de detonación ideal es la velocidad de detonación máxima del explosivo a dicha densidad.
- Cada explosivo tiene también un diámetro crítico, que consiste en el diámetro de carga mínimo en el cual el proceso de detonación, una vez iniciado, se sostiene a si mismo. Mientras mas grande sea el diámetro, mayor será la velocidad hasta que se alcance la velocidad de detonación ideal del explosivo.
- A mayor confinamiento de un explosivo mayor será la velocidad de detonación. La velocidad de detonación decrece al decrecer el diámetro de carga y la presión de confinamiento.

- Un descenso en la temperatura reducirá la sensibilidad de cualquier explosivo. Esto se debe a que la energía requerida para elevar la temperatura al nivel en donde sucede la reacción rápida es mayor.
- Un cebado adecuado garantiza que el explosivo alcanzara su velocidad máxima tan rápido como sea posible, bajo las condiciones en las que se lo emplea.

La mayoría de los explosivos comerciales usados hoy en día tiene velocidades de detonación que caen dentro del rango de 1 600 a 7 600 metros sobre segundo (m/s) (tabla II).

Tabla II. **Velocidad de detonación (m/s)**

Tipo	Diámetro en Milímetros (mm)		
	32 mm	76 mm	229 mm
Dinamita Granulada	2 100 – 5 800		
Dinamita Gelatina	3 600 – 7 600		
Emulsión Encartuchada	4 000 – 4 600	4 300 – 4 900	
Emulsión a Granel		4 300 – 4 900	3 700 – 5 800
ANFO Cargado Neumáticamente	2 100 – 3 000	3 700 – 4 300	4 300 – 4 600
ANFO Vaciado	1 800 – 2 100	3 000 – 3 400	4 300 – 4 600
ANFO Encartuchado		3 000 – 3 700	4 300 – 4 600
ANFO Pesado			3 400 – 5 800

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 34.

La velocidad de detonación es una variable importante que se emplea para calcular la presión de detonación de un explosivo.

2.2.2. Densidad

La densidad de empaquetamiento cuando un explosivo se coloca dentro de un taladro es una propiedad de gran importancia, pues determina la velocidad de detonación, el diámetro crítico y sensibilidad de la carga explosiva. También es importante debido a que los explosivos comerciales se compran, almacenan y utilizan sobre la base de su peso.

La densidad algunas veces denominada gravedad específica, se define como el peso por unidad de volumen y normalmente se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3).

La densidad de la mayoría de los explosivos comerciales varía en un rango que va de un mínimo aproximado de 0,8 a un máximo de 1,6, la densidad típica de algunos explosivos comerciales se da en la tabla III.

Tabla III. **Densidad típica de explosivos comerciales**

Tipo	Densidad (gr/cm^3)
Dinamita Granulada	0,8 – 1,4
Dinamita Gelatina	1,0 – 1,7
Emulsión Encartuchada	1,1 – 1,3
Emulsión a Granel	1,1 – 1,6
ANFO Cargado Neumáticamente	0,8 – 1,0
ANFO Vaciado	0,8 – 0,9
ANFO Encartuchado	1,1 – 1,2
ANFO Pesado	1,1 – 1,4

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 36.

2.2.3. Presión de detonación

Cuando un explosivo se detona, se libera una presión inmensa prácticamente en un parpadeo, es una onda de choque que existe solo por una fracción de segundo en un punto dado. La presión de detonación es el resultado de la densidad, la velocidad de detonación, y la velocidad de la partícula del explosivo.

La presión de detonación es importante dado que se relaciona con el nivel de estrés al que la roca se romperá, lo cual constituye un factor importante en la fragmentación, la presión repentina fragmentará la roca en lugar de desplazarla, a lo cual generalmente se le denomina potencia rompedora. La presión de detonación, se expresa en Giga pascales (GPa) por el sistema internacional (tabla IV), recordando que 0,1 Giga Pascales equivale a 1 000 Atmósferas = 1Kilo bares.

Tabla IV. Presión de detonación de algunos explosivos comerciales

Tipo	Presión de Detonación (GPa)
Dinamita Granulada	2 – 7
Dinamita Gelatina	7 – 14
Emulsión Encartuchada	2 – 10
Emulsión a Granel	2 – 10
ANFO Vaciado	0,7 – 4,5
ANFO Encartuchado	2 – 6
ANFO Pesado	2 - 9

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 35.

La presión de detonación no es igual a la presión del taladro o de explosión, la cual consiste en la presión de los gases explosivos expandidos hasta alcanzar el volumen inicial del taladro.

La presión del taladro es entonces igual a la presión de los productos en reacción después de que esta ha llegado a su fin hasta alcanzar un volumen constante. La presión de la explosión representa cerca del 45 por ciento de la presión de detonación, asumiendo la reacción completa en el frente de la detonación.

2.2.4. Resistencia al agua

La resistencia al agua usualmente se explica como el número de horas que el explosivo puede estar sumergido en agua estática y aun pueda detonar con certeza (tabla V). Este método de clasificar la resistencia al agua es el comúnmente usado en las hojas técnicas de los explosivos comerciales.

Tabla V. **Tolerancia al contacto con el agua sin deterioro**

Clase	Tiempo en horas (hrs)
1	72
2	48
3	24
4	12

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 26.

Otra manera que utilizan los fabricantes para describir la resistencia al agua de un explosivo es a través de los términos excelente, buena, regular o mala (tabla VI).

Tabla VI. **Resistencia al agua**

Tipo	Resistencia
Dinámica Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Buena a Excelente
Emulsión Encartuchada	Muy Buena
Emulsión a Granel	Muy Buena
ANFO colocado neumáticamente	Mala
ANFO Vaciado	Mala
ANFO Encartuchado	Muy Buena (mala si el empaque se rompe)
ANFO Pesado	Mala a Muy Buena

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 25.

La resistencia al agua de un explosivo no solo depende del envase que lo contiene y de la habilidad inherente del explosivo para soportar el agua, sino también de las características del agua que se encuentre presente. Los números de resistencia al agua, si los proporciona el fabricante, deberán usarse solo como guía ya que las condiciones del campo suelen variar mucho.

Debe conocerse las condiciones de agua con las que trabajan y emplear explosivos comerciales que se caractericen por desempeñarse bien bajo estas condiciones.

2.2.5. Sensibilidad

La sensibilidad es la absoluta o relativa facilidad con la que un explosivo puede ser iniciado y su habilidad de propagación a lo largo de la carga. El estímulo al que se expone el explosivo debe incluirse en cualquier referencia a la sensibilidad, ya sea que se trate de una onda de choque, impacto de baja velocidad, fricción, descarga electrostática, u otra fuente de energía. La iniciación accidental frecuentemente se relaciona a situaciones donde el explosivo esta expuesto a impactos o resulta aplastado entre objetos que se impactan entre si.

La sensibilidad de un explosivo controla el diámetro mínimo para usos prácticos. El diámetro mínimo o crítico, se usa frecuentemente para definir el diámetro mínimo en el cual un compuesto explosivo en particular detonara confiablemente (tabla VII).

Tabla VII. **Sensibilidad (diámetro crítico)**

Tipo	Diámetro Critico en milímetros (mm)		
	< 25 mm	25 mm – 50 mm	> 50 mm
Dinamita Granulada	X		
Dinamita Gelatina	X		
Emulsión Encartuchada	X	X	X
Emulsión a Granel		X	X
ANFO Colocado neumáticamente	X		
ANFO Vaciado		X	
ANFO Encartuchado		X	X
ANFO Pesado			X

Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 24.

Los explosivos finalmente tienen el propósito de detonar, nunca se debe abusar en modo alguno de un explosivo, sin importar su grado de seguridad, no hay duda de que detonaran bajo condiciones de impacto o choque.

2.2.6. Humos

Los gases de reacción que resultan de la detonación de explosivos comerciales y de agentes de voladura consisten principalmente en dos tipos; los que al mezclarse con el aire son considerados en sentido común como no tóxicos tales como el dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua; y los considerados gases venenosos, incluyendo el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, que se encuentran también presentes en pequeñas concentraciones conocidos como humos.

En voladuras abiertas, los humos usualmente constituyen poca preocupación si se pueden dispersar rápidamente por el movimiento del aire, en los casos en donde los humos puedan representar un problema, el empleo de explosivos y agentes de voladura formulados y fabricados apropiadamente generara cantidades mínimas de gases tóxicos.

Entre los factores que aumentan la generación de humos tenemos: formulaciones deficientes del producto, cebado inadecuado, insuficiente resistencia al agua, falta de confinamiento, reactividad del producto con respecto a la roca que se este rompiendo, y una reacción incompleta del explosivo.

El Instituto de Fabricantes de Explosivos de los Estados Unidos (IME) brinda un método para clasificar los humos a través de pruebas en la cámara *Bichel*, en esta se mide la cantidad de gases venenosos emanados por un

cartucho de 3,175 centímetros por 20,32 centímetros (1 ¼ por 8 pulgadas), o aproximadamente 200 gramos de explosivo con envoltura (tabla VIII).

Tabla VIII. **Clasificación de humos del Instituto de Fabricantes de Explosivos en Estados Unidos IME**

Clase	Volumen (cm ³) por cada 200 gramos
1	< 4 530
2	4 530 – 9 344
3	9 344 – 18 972

Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 656.

Algunos de los gases tóxicos o “humos” son inodoros e incoloros es por esto que en todo trabajo de voladura es obligatorio un período de espera adecuado, antes de retornar al área de la detonación del explosivo.

2.2.7. Inflamabilidad

La inflamabilidad se refiere a la facilidad con la que un explosivo se puede encender por calor, chispa, flama o fuego; siendo importante para su almacenamiento, trasportación y uso.

Los productos a base de agua tienen un potencial de detonación significativamente menor que la dinamia cuando se los somete a una llama, pero se debe remarcar que este es solamente un margen mayor de seguridad y no implica que se puedan autorizar practicas inseguras. Todos los compuestos explosivos deben ser tratados como altamente flamables.

Los explosivos comerciales pueden ser afectados en su desempeño si se almacenan bajo temperaturas extremas (tabla IX), arriba de 32,2 grados Celsius (°C), muchos compuestos se descomponen lentamente o cambian sus propiedades y la vida de anaquel disminuye.

Tabla IX. **Resistencia a la temperatura**

Tipo	Entre -18° C y 38° C
Dinamita Granulada	Buena
Dinamita Gelatina	Buena
Emulsión Encartuchada	Mala debajo de 4,5° C
Emulsión a Granel	Mala debajo de 4,5° C
ANFO Cargado neumáticamente	Mala arriba de 32,2° C
ANFO Vaciado	Mala arriba de 32,2° C
ANFO Empaquetado	Mala arriba de 32,2° C
ANFO Pesado	Mala debajo de 4,5° C

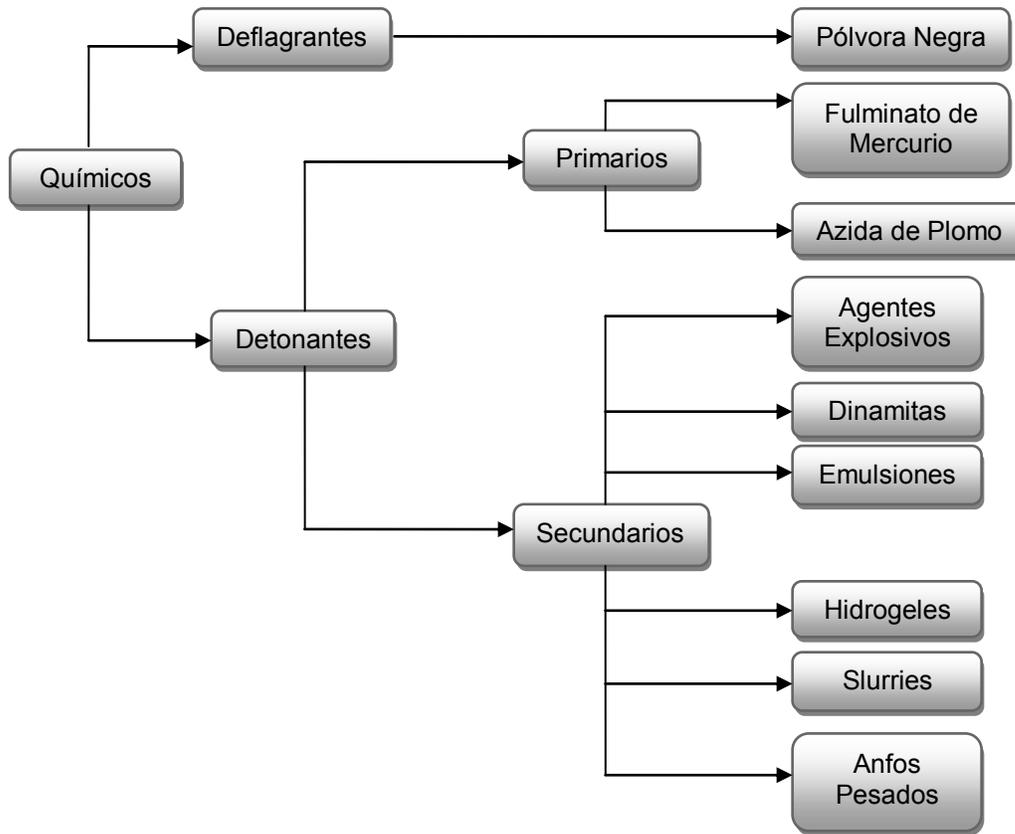
Fuente: KONYA, Calvin J; ALBARRAN, Enrique. Diseño de Voladuras. p. 28.

Algunos explosivos aunque son muy económicos, han perdido mercado debido a la inflamabilidad.

2.3. Clasificación de los explosivos comerciales

En los explosivos químicos radica la gama de explosivos comerciales utilizados en aplicaciones constructivas en infraestructura (figura 2).

Figura 2. **Clasificación de los explosivos químicos**



Fuente: Explosivos de Norteamérica, EMULGEL explosivos. Seminario funcionamiento y tipos de explosivos. p. 4.

Los explosivos químicos se dividen en deflagrantes y detonantes, los deflagrantes son aquellos que tienen rangos de descomposición menores a 1 000 metros sobre segundo (m/s) tal como la pólvora negra, que actualmente es un producto prácticamente en desuso.

Los explosivos detonantes son aquellos que tienen una velocidad de descomposición mayor de 1 000 metros sobre segundo (m/s), y se dividen en primarios y secundarios. Los primarios son aquellos que pueden detonar por medio de una chispa, flama o impacto y son usados normalmente en los iniciadores; los secundarios requieren de una onda de presión de gran magnitud para iniciar su detonación.

A continuación se describirán los diferentes productos explosivos existentes en el mercado y que pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones para voladura de roca en apertura y ampliación de carreteras.

2.3.1. Dinamitas

Dinamita es el término genérico que cubre a los explosivos sensibilizados con nitroglicerina, este tipo es el más sensible de los explosivos comerciales. Las dinamitas se envuelven en cartuchos cilíndricos de 19 milímetros (3/4 de pulgada) de diámetro o mas, con longitudes que van de 100 – 610 milímetros (4 a 24 pulgadas).

Se emplean varios cartuchos o envolturas de papel para envolver la dinamita y protegerla de la humedad. El peso (en relación al peso de la dinamita contenida dentro), el revestimiento y el tipo de envoltura juegan un rol importante en la producción de humos de la dinamita, su resistencia al agua, el atacado, y su facilidad de carga. Las dinamitas se empaquetan con el fin de obtener el balance apropiado de oxígeno y adaptarse a las características de carga necesarios para su uso.

En la tabla X se resumen las propiedades de algunas dinamitas típicas que pueden encontrarse en el mercado.

Tabla X. **Propiedades de dinamitas típicas**

	Tipo	Grado	Densidad		Velocidad		Resistencia al agua	Humos
			g/cm ³	Cartuchos de 32x200mm Por caja de 25Kg.	m/s	p/s		
Granular	Dinamita corriente	Dinamita para Zanja 50%	1,32	119	5 300	17 400	Muy Buena	Muy Malos
	Dinamita amoniacal	40%	1,32	119	3 000	9 760	Aceptable	Muy buenos
		60%	1,30	123	3 800	12 470	Muy buena	Muy buenos
Semi - Gelatinosa	Dinamita amoniacal		1,29	121	4 000	13 100	Muy buena	Muy buenos
			1,16	136	3 850	12 600	Muy buena	Muy buenos
			0,94	165	3 450	11 300	Buena	Muy buenos
Gelatinas	Gelatina corriente	80%	1,35	117	5 700	18 700	Excelente	Malos
	Gelatina amoniacal	60%	1,54	104	4 700	15 400	Excelente	Muy buenos
		40%	1,43	111	5 300	17 400	Excelente	Muy buenos

Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 61.

Al seleccionar un tipo de dinamita, se deben considerar una serie de factores: la densidad, dureza, fuerza, friabilidad, etc.; del material que se va a romper; el grado de fragmentación deseado; la presencia o ausencia de agua en el taladro; la ventilación disponible en las áreas de trabajo subterráneas; y la presencia de gases combustibles a polvo. Cada voladura presenta alguna variedad de estas condiciones; de ahí que la dinamita a elegir debe reunir la combinación adecuada de propiedades y una envoltura acorde al trabajo a realizar.

Existen tres clases básicas de dinamita: granular, semi-gelatinosa y gelatinosa. La diferencia principal radica en que la dinamita gelatinosa y la semi-gelatinosa contienen nitrocotton, una nitrocelulosa que se combina con la nitroglicerina para formar un gel cohesivo. Además de esta clasificación, la dinamitas también se diferencia por los materiales empleados para proporcionar su fuente de energía principal. En las dinamitas corrientes, la nitroglicerina es la fuente de energía principal, incrementada por la reacción de varios absorbentes activos llamados aditivos energéticos. Entre estos materiales, los más notables son el nitrato de sodio y los combustibles carbonosos.

2.3.1.1. Dinamitas granulares corrientes

En este tipo de dinamitas, la energía no solo derivaba de la nitroglicerina, sino también en parte de la reacción del nitrato de sodio con los combustibles.

Después de la introducción de las dinamitas amoniacaes, se limitó el uso de las dinamitas granulares corrientes para voladuras generales, debido al costo relativamente alto, la sensibilidad del choque y fricción, los gases nocivos, y los altos niveles de inflamabilidad.

La dinamita para zanjeo, una dinamita corriente al 50 por ciento, se diseñó para voladura de zanjas mediante el método de propagación, y es el único grado que ha sobrevivido hasta la actualidad.

2.3.1.2. Dinamitas amoniacaes granulares

También conocidas como dinamitas tipo "Extra", son dinamitas en las que la fuente de energía principal se deriva de la reacción del amonio y el nitrato de sodio con varios combustibles. En estas dinamitas la nitroglicerina es reemplazada por el nitrato de amonio, siendo el nitrato de amonio la fuente de energía principal, con una energía explosiva de aproximadamente un 70 por ciento de la energía de la nitroglicerina.

Las ventajas económicas y de seguridad de estas dinamitas amoniacaes superan con creces cualquier sacrificio en su desempeño respecto a las dinamitas corrientes.

2.3.1.3. Dinamitas semi gelatinosas

Son dinamitas amoniacaes que contienen una pequeña cantidad de nitroccotton, el que funciona como agente gelificante. Estos productos tienen una mejor resistencia al agua y una textura semigelatinosa y más cohesiva que las dinamitas granulares.

En las operaciones de pre-corte y otras técnicas de voladura controlada se emplea frecuentemente una dinamita amoniacal semi-gelatinosa de 22 milímetros de diámetro por 610 milímetros de largo (7/8 x 24 pulgadas).

2.3.1.4. Dinamitas gelatinosas corrientes

Contienen nitroglicerina y nitrocotton como los únicos ingredientes explosivos, y nitrato de sodio como otros aditivos energéticos. Son densas, plásticas, cohesivas y altamente resistentes al agua se emplean para la voladura de rocas muy duras y fuertes.

2.3.1.5. Dinamitas de gel amoniacal o gelatinas tipo extra

Lo que diferencia a estas dinamitas de las gelatinas corrientes es que una porción de su fuerza se deriva del nitrato de amonio. Estos explosivos son muy utilizados, debido a su alta densidad y velocidad, además de su buena resistencia al agua.

2.3.2. Hidrogeles / *Slurries*

Un explosivo en hidrogel / *Slurries* es básicamente una solución acuosa espesada de un oxidante y/o sales de combustibles, en la que se dispersan oxidantes sólidos adicionales y/o combustibles, así como también sensibilizadores (gelatinizador, un sensibilizador explosivo o no explosivo, nitrato de amonio, nitrato de sodio y agua).

Dada su combinación de elementos los hidrogeles son intrínsecamente menos sensibles que los explosivos tradicionales de dinamita a base de nitroglicerina y sin agua, es decir, los hidrogeles son menos sensibles al estímulo de tipo accidental.

Los hidrogeles brindan una serie de ventajas de seguridad en el campo, así también reduciendo las posibilidades de detonación accidental por impacto, choque o quemado. Entre las más importantes se encuentran:

- Control de la densidad en el taladro.
- Mayor flexibilidad en la cantidad de explosivo para el transporte.
- Excelente control de fragmentación.
- Menor tendencia a la propagación de taladro a taladro.
- Reducción de humo y gases tóxicos.
- Eliminación de los dolores de cabeza causados por la nitroglicerina.

Además de mejorar la seguridad, algunas propiedades variables importantes de los explosivos en hidrogel incluyen:

- Para la mayoría de explosivo en hidrogel, la energía se ubica en un rango entre 700 y 1 500 calorías por gramo.
- Las densidades de los hidrogeles oscilan desde aproximadamente 0,80 a cerca de 1,60 gramos por centímetro cúbico.
- La velocidad de detonación de los hidrogeles aumenta a medida que aumentan su diámetro y grado de confinamiento.
- Los explosivos hidrogeles son considerablemente más resistentes que la dinamita a la iniciación accidental resultante de un impacto excesivo, choque, o fuego.

- La consistencia de la mayoría de los hidrogeles encartuchado se diseña para que sean firmes, pero a la vez para que se asienten fácilmente en el taladro cuando se haga un corte en el cartucho para aumentar la densidad.

La tabla XI ilustra algunas propiedades generales de hidrogeles disponibles en la actualidad.

Tabla XI. **Propiedades generales de algunos explosivos en hidrogel**

Diámetros disponibles	Densidad g/cm ³	Velocidad de detonación		Potencia relativa	
		m/s	p/s	Por peso	Por Volumen
100-200mm (4"-8")	1,33	5 700	18 700	80	128
63-200mm (2½"-8")	1,49	4 600	15 100	89	159
100-200mm (4"-8")	1,18	4 000	13 230	91	130
75-200mm (3"-8")	1,52	4 500	14 760	93	169
75-200mm (3"-8")	1,21	4 900	16 150	94	138
100-150mm (4"-6")	1,20	5 420	17 200	99	143
127-228mm (5"-9")	1,25	5 800	19 000	105	153
75 -200mm (3"-8")	1,42	5 100	16 730	106	183
45-127mm (1¾"-5")	1,20	4 800	15 750	101	146

Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 69.

2.3.3. Explosivos en emulsión

La elección del explosivo en emulsión que se va a utilizar depende de muchas variables. Se deben tener en cuenta todas las propiedades del

explosivo (tabla XII), así como las de la roca que se va a romper, son particularmente apropiadas para mejorar la fragmentación en roca masiva dura y romper fondos de roca dura.

Tabla XII. **Propiedades generales de algunos explosivos en emulsión**

Diámetros disponibles	Densidad g/cm ³	Velocidad de detonación		Potencia relativa	
		m/s	p/s	Por peso	Por volumen
32-38mm (1¼"- 1½")	0,95	4 000	13 120	89	103
32-65mm (1¼"-2½")	1,15	5 100	16 700	73	101
32-65mm (1¼"-2½")	1,17	5 150	16 900	76	107
50-90mm (2"-3½")	1,20	5 180	17 000	85	121
50-90mm (2"-3½")	1,20	5 030	16 500	105	150
50-90mm (2"-3½")	1,24	5 030	16 500	106	156
50.95mm (2"-3¾")	1,25	5 250	17 100	82	125
>127mm (5")	1,25	5 200	17 100	76	116
>100mm (4")	1,25	5 790	19 000	78	115
>90mm (3 ½")	1,28	4 950	16 220	88	132

Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 77.

Una emulsión es una mezcla compacta de dos líquidos que no se disuelven uno a otro con una fase líquida uniforme dispersa a través de la segunda fase. Los explosivos en emulsión consisten en dispersiones de soluciones acuosas de oxidantes en un medio oleoso, o emulsiones de agua en aceite. Es precisamente esta estructura única, y el elevado porcentaje de oxidante en relación al combustible lo que da a los explosivos en emulsión sus características especiales.

Debido a la necesidad de contar con un balance de oxígeno cercano a cero, los explosivos en emulsión requieren que el volumen de oxidante sea mucho mayor al volumen de aceite, esta proporción es aproximadamente 9 a 1. Ya que el volumen relativo del aceite es muy inferior al del oxidante, este se debe esparcir en una capa muy delgada con el fin de cubrir todas las gotitas del oxidante.

Debido a que las sales oxidantes permanecen en solución, las propiedades de detonación de los explosivos en emulsión permanecen sin modificación por largos periodos de tiempo, entre estas:

- Las emulsiones tienen una mayor resistencia a la iniciación por impacto que los hidrogeles o las dinamitas, ofrecen un mayor grado de seguridad, sin embargo sin importar su grado de seguridad, nunca se debe abusar de ellas.
- La velocidad de detonación de los explosivos en emulsión es muy alta, esta velocidad disminuye hasta cierto punto a medida que el diámetro de la carga también disminuye.
- Puesto que las emulsiones tienen velocidad de detonación alta y una densidad razonable, también tienen una presión de detonación relativamente alta.
- Las emulsiones son sensibles a lo largo de una amplia gama de temperatura y también mantienen su sensibilidad a través de varios diámetros.

- Mientras menor es la densidad de un explosivo en emulsión, mas sensible se vuelve este. Del mismo modo, mientras menor sea el contenido de agua en la emulsión, mayor será su sensibilidad.

2.3.4. ANFO – Prills de voladura

El nitrato de amonio es un ingrediente en casi todos los explosivos comerciales incluyendo la dinamita, hidrogeles y emulsiones. Sin embargo, su uso principal es en la forma de una pequeña esfera porosa llamada “prill”, mezclada con aceite combustible.

El *ammoniom nitrate-fuel oil* (ANFO), es una mezcla de nitrato de amonio (grado industrial en un 94,3 por ciento y aceite combustible (diesel) en un 5,7 por ciento en peso, existen productos modificados en los cuales se emplean sustancia tales como el aluminio refinado o materiales carbonosos, en combinación con el combustible diesel No. 2 o cuando el prill se mezcla con el combustible diesel No.2 y se empaqueta con una envoltura resistente al agua. Sin embargo hay que recordar que cuando el porcentaje de aceite combustible varia, ya sea positiva o negativamente, hay un efecto de perdida de energía, y generación de gases nocivos, por lo cual es de suma importancia, su proporcionamiento adecuado.

Las propiedades físicas del ANFO como explosivo comercial varían en relación a los factores que influyen en su capacidad de detonación:

- La velocidad de detonación del ANFO aumenta a medida que el diámetro del taladro aumenta, el tipo de confinamiento que rodea el ANFO afecta de manera importante la velocidad de detonación, así como su habilidad para sostener la detonación de diámetros pequeños.

- La densidad del ANFO depende de la densidad y el tamaño del prill de nitrato de amonio empleado en la mezcla. Los prills que más se adecuan a los productos de voladura tienen una densidad de partícula que va de 1,3 a 1,5 gramos sobre centímetros cúbicos.
- El agua desensibiliza al ANFO, esta disuelve rápidamente los prills de nitrato de amonio que tienen una envoltura deficiente.
- El ANFO adecuadamente preparado y correctamente aplicado producirá humos de clase I, significa que tiene muy buenas características en cuanto a la producción de humos.

Desde su introducción en la década de los cincuenta, los productos ANFO ha sido objeto de una amplia gama de aplicaciones en operaciones de voladura, variado a si la manera en que se presenta en el mercado.

2.3.4.1. ANFO a granel

La naturaleza fluida del ANFO se adapta bien a las aplicaciones de almacenaje y cantidad al transportar, pues se transporta directamente desde silos de almacenaje al lugar donde se lleva a cabo la voladura en camiones diseñado para el producto (ya sea de forma mecánica o neumática), directamente hacia los taladros.

2.3.4.2. ANFO envasado en bolsas de papel de varias capas

El ANFO mezclado uniformemente, de libre fluido, se puede verter desde bolsas de papel de varia capas hacia los taladro. También se puede cargar

desde recipientes a presión o desde cargadores ligero, de tipo eyector, hacia taladros pequeños de hasta 25 milímetros de diámetro.

2.3.4.3. ANFO en cartuchos cilíndricos

Los prills triturados de nitrato de amonio o una mezcla de prills triturados y enteros de nitrato de amonio combinado con aceite combustible, empaquetados en tubos de tela o de cartón con forros firmes de plástico, se emplean en taladros con agua de mas de 150 milímetros de diámetro, a consecuencia de las características de los prills la resistencia al gua del producto depende por completo de la integridad de la envoltura

2.3.4.4. ANFO pesado

El ANFO pesado es una combinación de perlas de nitrato de amonio, diesel y suspensión, es decir mezclas de emulsiones a granel y agentes explosivos. La ventaja de las mezcla es que se pueden hacer y cargar fácilmente el barreno, además requiere menos personar para su colocación pues es bombeado directamente al barreno desde un camión.

2.3.5. Mezclas

La mezclas se entiende como combinaciones de emulsiones de agua en combustible y ANFO, es decir una matriz de material explosivo a base de agua con un nitrato de amonio o una matriz oxidante a base de agua con nitrato de amonio.

Las mezclas se pueden combinar empleando una variedad de fórmulas de emulsiones mezcladas con ANFO o nitrato de amonio, en equipos que hayan

sido diseñados para garantizar un manejo seguro y eficiente de estos dos componentes. Los propósitos principales de las mezclas son:

- Aumentar la densidad del ANFO.
- Brindar al ANFO una mayor resistencia al agua.
- Reducir los costos.

Entonces al aumentar la densidad del ANFO, aumenta la energía útil relativa de la mezcla permitiendo aumentar el espaciamiento entre los taladros, ya que se puede cargar un peso mayor de explosivos en cada taladro, los costos de perforación por unidad se reducen y la capacidad de la perforadora se incrementa debido a que se necesitan menos taladros para romper un volumen de roca.

En la voladura de roca para la apertura y ampliación de carreteras, la selección del explosivo puede representar una gran diferencia en el costo por tonelada para un grado de fragmentación determinado, en el manipuleo y procesamiento posterior de la roca volada.

La variedad en los productos explosivos proporciona una amplia gama de densidades y energías explosivas que se pueden utilizar para optimizar la voladura, incluyendo los costos de perforación, voladura, extracción y transporte.

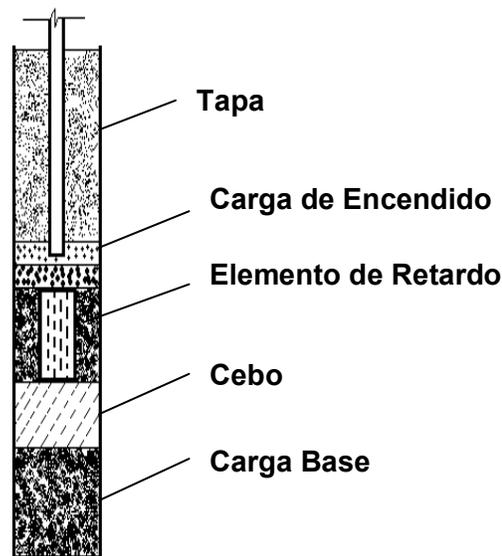
2.4. Accesorios de iniciación

El término iniciador se emplea para describir a cualquier dispositivo que pueda usarse con el fin de inicial una detonación o una deflagración. Los

dispositivos que inician altos explosivos se llaman detonadores y los dispositivos que inician una combustión o una deflagración se llaman fulminantes.

Un detonador es un dispositivo completo de iniciación de un explosivo, el cual incluye la parte activa del montaje usualmente encerrada en una cápsula de metal y un transmisor adjunto de la señal de iniciación (figura 3).

Figura 3. **Esquema genérico de un iniciador**



Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 110.

Hoy en día el término fulminante casi no se utiliza, excepto si es para describir al dispositivo utilizado en combinación con la mecha de seguridad convencional.

2.4.1. Mecha de seguridad convencional y fulminantes para mecha

Después de que se introdujeron los explosivos detonantes y hasta que los métodos eléctricos se hicieron conocidos, el sistema de fulminante y mecha fue el método de iniciación preferido.

Los fulminantes modernos consisten en capsulad de bronce o aluminio cargadas con un explosivo de iniciación en polvo que va encima de la carga base del explosivo secundario, el cual esta presionado estrechamente en el fondo de la cápsula. Ya que el explosivo de iniciación esta expuesto en el extremo abierto de la capsula, los fulminantes nunca se deben alterar ni se debe abusar de ellos en modo alguno, pues esto puede ocasionar una detonación prematura y esto causar heridas graves.

La mecha de seguridad es el medio a través del cual se transmite una reacción de combustión a una velocidad relativamente uniforme hacia el área de incendio del fulminante. El núcleo de la mecha de seguridad consiste en una línea de pólvora negra envuelta con fuerza por cubiertas de cinta, telas y materiales impermeables como el asfalto y los plásticos. Existe una gran variedad de métodos que se emplean para encender la mecha de seguridad.

El encendedor de mecha de alambre caliente es un dispositivo similar en apariencia a una bengala de fuegos artificiales, se inicia con un fósforo y se puede usar para encender la mecha simplemente sujetando la porción de combustión del encendedor contra el extremo recientemente cortado de la mecha.

El encendedor de tira del alambre es un tubo de papel cerrado en un extremo que contiene un dispositivo de encendido que consiste en un compuesto percutor colocado sobre el alambre que sobresale a través del extremo cerrado del tubo, la mecha se enciende tirando del alambre que sale fuera del tubo.

Cuando se utiliza el sistema de mecha rápida y conectores de mecha rápida, la mecha de seguridad se corta en longitudes iguales y la mecha rápida se quema a una velocidad fija la cual, a su vez, enciende el conector de la mecha rápida que esta adherido a la mecha. La secuencia de retardo resulta de la velocidad de combustión de la mecha rápida. El conector de mecha rápida es una cápsula de metal pequeña con una ranura en un extremo y un compuesto de encendido interno que se quema a calor intenso.

2.4.2. Cordón detonante

El cordón detonante es un cordón flexible, redondo que contiene un núcleo de explosivo alto. Este cordón detona a una velocidad de aproximadamente 6 700 metros por segundo (22 000 pies por segundo).

Normalmente la carga del núcleo del cordón se expresa en gramos de explosivo por metro lineal del cordón (g/m). Los cordones más usados tienen de 3,2 a 12,7 gramos por metro, aunque también existen cargas de núcleo con tan solo 0,4 y hasta más de 85 gramos por metro. El núcleo del explosivo, normalmente Tetranitrato de Pentaeritrol (PETN) (tabla XIII), se cubre con varias combinaciones de materiales.

Tabla XIII. **Cordones detonantes con PETN**

Carga del núcleo		Diámetro externo		Resistencia tensional	
gr/p	gr/m	Pulgadas (plg.)	Milímetros (mm)	Libras (Lb)	Kilogramos (kg)
2,4	0,5	0,100	2,5	120	54
6	1,3			120	54
7,5	1,6	0,125	3,175	150	68
9,5	2,0	0,127	3,2	198	90
15	3,2	0,140	3,56	230	104
15	3,2	0,144	3,658	240	113
15	3,2	0,146	3,7	165	75
18	3,8	0,160	4,06	230	104
18	3,8	0,142	3,607	150	68
21	4,5	0,117	3,0	174	79
23	4,9	0,165	4,2	220	100
23	4,9	0,165	4,2	220	100
25	5,3	0,165	4,2	220	100
25	5,3	0,179	4,32	230	104
25	5,3	0,157	3,988	150	68
25	5,3	0,141	3,581	110	50
25	5,3	0,173	4,4	220	100
35	7,5	0,185	4,7	240	109
35	7,5	0,185	4,7	220	100
40	8,5	0,180	4,57	250	113
40	8,5	0,175	4,45	250	113
40	8,5	0,190	4,826	200	91
48	10,2	0,172	4,4	220	100
48	10,2	0,200	5,1	284	129
48	10,2	0,200	5,1	232	100
50	10,6	0,190	4,83	250	113
50	10,6	0,185	4,677	200	91
60	12,8	0,215	5,46	325	147
150	31,9	0,312	7,92	275	125
150	31,9	0,285	7,23	180	82
175	37,2	0,305	7,75	185	84
200	42,5	0,340	8,64	275	125
400	85,0	0,425	10,80	300	136
400	85,0	0,433	11,0	440	200

Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 114.

La habilidad del cordón detonante para propagarse de manera confiable a través de empalmes y conexiones e inicial otros explosivos depende en parte de la densidad de cargado y el peso lineal de la carga explosiva del núcleo, además del tipo de cubierta que rodea a este.

Para brindar una secuencia de retardo entre taladros en fila y entre filas de taladros, se puede interrumpir el cordón detonante de la superficie con la introducción de un retardo de superficie, existe en el mercado una amplia gama de retardo de milisegundo siendo quizás los de 9, 17, 25 y 42 milésimas de segundo los más populares.

Los cebos deslizantes son dispositivos de iniciación por retardo en el taladro que se emplean con cordón detonante para cebar tacos individuales de explosivo no sensible al detonador. Se necesita un aumentador de pentolita especial para colocar el cordón detonante y asegurar un detonador de retardo no eléctrico. Un *booster* o aumentador de pentolita son explosivos sensibles al detonador que por lo general contienen el explosivo alto denominado Trinitrotolueno (TNT) como el material a fundir.

2.4.3. Encendedores de chispa o eléctricos

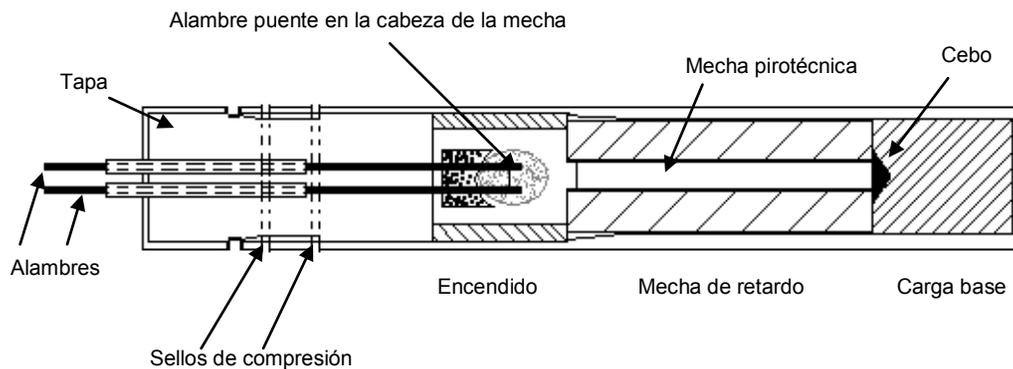
Estos encendedores se emplean para iniciar una reacción de combustión y su uso principal en voladura consiste en encender la pólvora negra. Los encendedores de chispa tienen un uso limitado en la voladura comercial y se están volviendo difíciles de conseguir, pues el uso de la pólvora como explosivo para voladuras es en la actualidad poco frecuente.

2.4.4. Detonadores eléctricos

Estos son los detonadores eléctricos de corriente de encendido bajo, medio y alto, detonadores de puente semiconductor, detonadores de voladura eléctrica/ inducción toroidal, detonadores de alambre puente explosivo y el detonador eléctrico.

El detonador eléctrico consiste en una cápsula de metal que contiene una carga base de alto explosivo diseñada para iniciar otros explosivos. Sobre la carga base se encuentra una carga pequeña de un explosivo primario (carga de cebo) que convierte una reacción de combustión transmitida desde la mecha de encendido, o mecha pirotécnica, en una reacción de detonación. Sobre la cara de cebo, en los detonadores de retardo, se encuentra un elemento de retardo pirotécnico que se quema a una velocidad conocida y cuya longitud y composición controlan el tiempo de tránsito de frente de combustión (figura 4).

Figura 4. Detonador eléctrico



Fuente: DuPONT. *Blaster's Handbook*. p. 88.

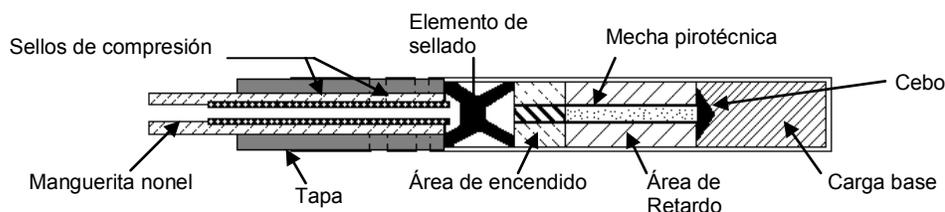
Todos los detonadores eléctricos comerciales modernos incluyen una característica interna diseñada para prevenir que la energía electrostática provoque la iniciación accidental del detonador, también vienen con una etiqueta distintiva y numerada para facilitar la identificación del período de retardo.

Entre los detonadores eléctricos también existe el detonador electrónico, este es el progreso mas reciente en las técnicas de iniciación de una voladura. La ventaja radica en que su secuencia de iniciación es muy precisa. El tiempo de iniciación se controla con un chip de circuito integrado y un condensador interno en cada detonador. En la actualidad, existen muchas variedades de detonadores electrónicos que se encuentran en etapa de prueba, pero todavía ninguno ha alcanzado un uso comercial amplio.

2.4.5. Detonadores de retardo no eléctricos

Esta clasificación incluye a aquellos detonadores que se activan mediante un cordón detonante en miniatura y manguerita nonel. El sistema de iniciación de manguerita nonel utiliza un fenómeno de explosión de polvo en un tubo plástico casi vacío para transmitir la señal de iniciación (figura 5).

Figura 5. Detonador de manguerita nonel



Fuente: DuPONT. *Blaster's Handbook*. p. 98.

La manguerita nonel es muy poco sensible a la iniciación por calor o impacto comunes, requiere de un choque de gran intensidad para iniciarse y trasmite la señal a aproximadamente 1 980 a 2 130 metros por segundo (6 500 a 7 000 pies por segundo).

Las ventajas de los sistemas de iniciación no eléctrica versus los de iniciación eléctrica se perciben principalmente por su palta de susceptibilidad a la activación prematura por efecto de las corrientes extrañas.

Existe una clasificación más general de los detonadores de retardo incluyendo a los Instantáneos pudiendo ser tanto eléctricos como no eléctricos; los retardos de milisegundos que han probado ser eficiente en el mejoramiento de la fragmentación y desplazamiento de la roca brindado un mejor control en las vibraciones de la voladura y los retardos de período largo que se emplean principalmente en operaciones de minería.

Mucho trabajo de ingeniería y control cuidadoso se lleva a cabo en la fabricación de los accesorios de iniciación de hoy en día, convirtiéndolos en dispositivos de precisión confiables y de un alto nivel de mecanización, sin embargo no debe olvidarse que cualquiera que haga uso o controle su empleo, tiene la responsabilidad de mantener un control estricto en cuanto a su almacenamiento, transporte y uso, además de informar a cualquiera que pueda tener contacto con ellos, de los peligros potenciales de los mismos.

3. MARCO LEGAL PARA EL USO DE EXPLOSIVOS EN GUATEMALA

3.1. Leyes existentes

Dada la naturaleza propia de los explosivos comerciales y medio sobre el que actúan, estos requieren de un manejo y uso cuidadoso. Es entonces necesario el cumplimiento de los lineamientos dictados por el marco legal para su uso, manejo, almacenaje y transporte.

3.1.1. Acuerdo Gubernativo No. 123-85, Ley de Especies Estancadas

Publicada en el Diario Oficial el 21 de junio de 1985 fue creada con el fin de transmitir al Ministerio de la Defensa de Guatemala algunas atribuciones que venia desempeñando la Dirección de Rentas Internas, dependencia del Ministerio de Finanzas Públicas.

En esta ley se define el término Especie Estancada como: los cloratos, los nitratos, los explosivos, los cartuchos, los fulminantes, las municiones, la pólvora y otros materiales susceptibles de ser utilizados para la fabricación de artefactos explosivos (Capítulo I, Artículo 1).

En su capítulo II se estipula bajo que lineamientos el Ministerio de la Defensa Nacional podrá autorizar la importación, comercialización y trasportación de especies estancadas directamente y por cuenta de las personas individuales o jurídicas que efectúan dichas actividades.

En el artículo 24, se designa al Estado la responsabilidad de fabricar, con exclusividad, los explosivos para fines industriales y los artefactos para hacerlos estallar y que también podrán ser fabricados por personas jurídicas con las cuales el Estado o sus entidades descentralizadas autónomas y semiautónomas, se asocien para dichos propósitos.

También en su artículo 25 establece que los contratistas de obras del estado de cualquiera de sus entidades descentralizadas, autónomas semiautónomas y cualesquiera otras de similar naturaleza que actúen en función pública, quedan obligados a adquirir explosivos para fines industriales y los artefactos para hacerlos estallar, por intermedio de las entidades a las que se refiere el artículo 24, para cuyo efecto en los respectivos contratos deberán hacer constar específicamente esta obligación.

El artículo 25 es de remarcada importancia ya que los proyectos desarrollados con explosivos para la voladura de roca en la apertura y ampliación de carreteras están ligados a entidades estatales. Esta ley con sus treinta y un artículos debe ser estudiada y analizada por cualquier profesional de la construcción que desee utilizar explosivos en el desarrollo de un proyecto vial.

3.1.2. Acuerdo Gubernativo No. 14-74, Reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos

Este reglamento tiene por objeto establecer las normas a seguir en todo lo relacionado con la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivo para fines industriales y los artefactos para hacerlos estallar.

Se consideran como explosivo para fines industriales, todos aquellos que no sean de uso exclusivo del Ejército de Guatemala y cuya utilización sea autorizada por el Ministerio de la Defensa Nacional previo dictamen favorable del Estado Mayor General del Ejército, de acuerdo con las características de los fines de su empleo (Reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos, Capítulo I, Artículo 2).

Los trabajos de voladura en apertura y ampliación de carreteras implican la utilización de explosivos industriales, lo cual es a lo que se refiere el reglamento, es indispensable acatar cada uno de los lineamientos del mismo al momento de transporte, almacenaje y uso, así como su importación. Tomando en cuenta que el trabajo de voladura debe de llevarse a cabo por un Experto en Explosivos o Experto Dinamitero, cuyas licencias serán extendidas por el Ministerio de la Defensa Nacional. El ingeniero civil o profesional de la construcción a cargo del proyecto debe trabajar de manera conjunta con el experto, para realizar una voladura que satisfaga las necesidades del mismo.

3.1.3. Acuerdo Gubernativo No. 13-79, Modificación del capítulo VII del reglamento para la importación, transporte y uso de explosivos

En este se establecen modificaciones al Capítulo VII del reglamento para la importación, transporte y uso de explosivos, el Capítulo VII de dicho reglamento se refiere a los expertos, clasificándolos como experto en explosivos y expertos dinamiteros según la licencia. Se estable los requisitos que debe llenar un experto en ambas clasificaciones, así como los mecanismos para la obtención de sus licencias y la duración de las mismas.

3.1.4. Acuerdo Gubernativo No. 372-94, Modificación al artículo 50 del reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de los explosivos

El Artículo 50 del reglamento establece que los viáticos y demás gastos en que incurran los custodios para el traslado, control y vigilancia de explosivos de uso industrial y su monto en función de la tabla de viáticos autorizada por el Ministerio de la Defensa Nacional, correrán por cuenta de los interesados.

3.1.5. Acuerdo Gubernativo No. 28-2004, Reglamento de actividad pirotécnica

Aunque este reglamento no está directamente ligado a los explosivos utilizados para la apertura y ampliación de carreteras, si contempla lineamientos de seguridad para el manejo, transporte y almacenamiento de productos explosivos, dichos lineamientos deben ser tomados en cuenta al momento de utilizar explosivos específicos para trabajos en carretera.

3.2. Dependencias estatales involucradas

Es el Ministerio de la Defensa Nacional de Guatemala el ente rector en lo relacionado con el control e inspección de entidades públicas o privadas en lo relativo al uso de las denominadas Especies Estancadas. En la Dirección General Administrativa del Ministerio de la Defensa Nacional está el Departamento de Especies Estancadas que se encarga del control de estos materiales, que por su composición son susceptibles a cambiar su naturaleza en forma rápida y violenta, afectando el entorno.

El Departamento de Especies Estancadas dirige, coordina, supervisa los procedimientos y funciones referentes a las especies estancadas, con la finalidad de asesorar y recomendar la toma de decisión del Ministro de la Defensa Nacional.

El Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas, así como el de Economía juegan un rol importante en la obtención de licencias para importación y uso de explosivos industriales.

Los Expertos en explosivos y Expertos dinamiteros deben estar registrados en la Sección de Seguridad e Higiene y Previsión de Accidentes en General del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social y en el Ministerio de trabajo y Previsión Social. El Departamento de Seguridad e Higiene del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, determina las medidas especiales de seguridad para el manejo de explosivos.

3.3. Permisos

Referente al uso e importación de explosivos industriales (ó comerciales) y artefactos para hacerlos estallar, puede realizarse solamente por las personas individuales y jurídicas de reconocida experiencia, previo permiso expreso y por escrito del Ministerio de la Defensa Nacional. Los interesados deben presentar sus solicitudes al Ministerio de Comunicaciones y Obras públicas, para que disponga las inspecciones oculares pertinentes en los lugares donde vayan a ser usados, el expediente pasara luego al Ministerio de Economía, para que fije la fianza adecuada para responder a los daños y perjuicios que se causaren. Llenados los requisitos anteriores y acompañando la póliza de fianza correspondiente se acudiría finalmente al Ministerio de la Defensa Nacional, quien concederá o denegará el permiso solicitado.

El manipuleo y quema de los explosivos solo podrá llevarla a cabo un experto debidamente autorizado por el Ministerio de la Defensa Nacional, pudiendo ser toda persona que posea altos conocimientos técnicos, prácticos, de reglamentación actualizados sobre explosivos comerciales y previo haber aprobado satisfactoriamente el examen respectivo en el Cuerpo de Ingenieros del Ejército.

Todas las operaciones de transporte de explosivos para fines industriales deberán estar bajo el control y vigilancia d una custodia militar, nombrada por los Comandantes de Zonas Bases o por los Jefes de las Dependencias Militares que corresponda. El transporte de explosivos para uso industrial y de los artefactos para hacerlos estallar, se podrá efectuar dentro del territorio de la República, solamente con previa autorización por escrito del Ministerio de la Defensa Nacional.

3.4. Almacenaje de explosivos y accesorios

Todo explosivo comercial y artefactos para hacerlos estallar, deberán ser almacenados exclusivamente en alguno de los lugares siguientes:

- Polvorín Nacional
- Almacenes de las dependencias del ejército
- En los almacenes de otras dependencias del Estado, dependencias municipales; entidades autónomas, semiautónomas o descentralizadas; o de particulares, siempre y cuando estén instalados en los lugares donde su uso vaya a ser inmediato, estando estos almacenes autorizados de forma escrita previamente por el Ministerio de la Defensa Nacional.

Los almacenes del inciso c), no podrán instalarse a una distancia menor de 1 000 metros de las poblaciones; y para evitar daños y perjuicios a terceros deben llenar los requisitos mínimos de seguridad, para cuyo efecto el cuerpo de ingenieros del ejército lo determinara en cada caso. Cuando se trate de nuevas construcciones el cuerpo de ingenieros del ejército aprobará previamente los planos respectivos.

Los almacenes y depósitos para explosivos, deberán estar bajo el control y vigilancia de una custodia militar, nombrada por los comandantes de las Zonas o Bases Militares o por los jefes de las dependencias militares correspondientes.

El control de los explosivos, cualquiera que sea su clase y propietario, se llevará en el Polvorín Nacional, en los almacenes de las dependencias militares y demás polvorines autorizados, en un Libro de Almacén, debidamente autorizado por el Ministro de la Defensa Nacional, que se denominará explosivos en depósito.

4. APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS

4.1. Generalidades

Un transporte rápido y seguro debe ser el fin de la construcción y rehabilitación de carreteras. Estas carreteras van desde la más grande, normalmente autopistas de peaje, hasta carreteras estrechas y panorámicas, que atraviesan zonas montañosas, parques naturales y bosques.

Al diseñar las carreteras, se localiza el centro y las rasantes adecuadas de la misma buscando minimizar la excavación, la que se llevara a cabo tomando en cuenta el entorno natural del terreno, los límites especificados para las gradientes y curvas. Lo ideal es que los volúmenes de cortes equilibren los volúmenes requeridos de rellenos, dentro de una distancia económicamente razonable de transporte.

El material roto o volado resultante de los cortes se deposita en rellenos adyacentes esparciéndose y compactándose en forma de capas, utilizando equipo pesado. Estas capas generalmente tendrán un grosor de 0,15 a 0,30 metros dependiendo del tipo de material. Si las zonas de relleno no requieren del total de material excavado, el exceso se desecha, en áreas de depósito previamente establecidas.

Al iniciar la apertura, en los casos en que sea posible, se retira primero el material suelto de la parte superior del corte utilizando equipo descendente y transporte. Estos equipos incluyen cucharas o raspadoras mecánicas que pueden transportar mas de 38 metros cúbicos; palancas hidráulicas con una

capacidad de 2,3 a 11,5 metros cúbicos; cargadores frontales grandes y unidades de transporte que pueden trabajar en el rango de 11,5 a 23 metros cúbicos. Retirando el material flojo de la superficie, así como parte de la formación sólida, hasta que ésta se vuelve demasiado compacta y dura, comenzando a ocasionar un desgaste excesivo en el equipo.

Debe de tomarse en cuenta que aun cuando los rastrillos grandes unidos a la parte posterior de *bulldózers* desprenden el material sin necesidad de realizar una voladura, la baja producción y el desgaste excesivo de la maquinaria hacen que en muchos casos la voladura sea una opción más económica.

Cuando se emplean explosivos se recomienda dejar sobre el material sólido que se va a romper, un grosor de 0,6 a 1,2 metros de material que podría ser extraído con maquinaria, este material funciona como una cubierta para prevenir el exceso de piedras volantes y permite que los explosivos llenen una mayor parte del taladro, lo que contribuirá a una voladura mas eficiente.

La voladura permite fragmentar la roca a dimensiones manejables para los equipos de carga y transporte. La onda de choque creada por la detonación avanza hacia el frente y es reflejada por este: las interferencias causadas en la reflexión son las que realizan la mayor parte de la fragmentación.

4.2. Descripción de zonas pobladas, arqueológicas, instalaciones en general o servicios, estructuras, flora y fauna

En consideración a las características detonantes del material explosivo y sus efectos en el medio sobre el que actúa, es requerido tomar en cuenta el entorno al área en donde será realizada una voladura.

4.2.1. Zonas pobladas

Es una condicionante externa en la apertura de una carretera o ampliación de la misma, es decir el grado de desarrollo humano existente en su entorno, distinguiéndose tres situaciones típicas:

- Una nueva vía en un entorno rural, se caracteriza por una gran libertad en cuanto a planificación de la obra, teniendo como condicionante más destacada la topografía de la zona; es frecuente que no existan muchas intersecciones o accesos a propiedades colindantes.
- Una nueva vía en un entorno urbano o periurbano, implica la necesidad de numerosos desvíos de tráfico, y en la carretera abundarán las intersecciones y los accesos a propiedades colindantes.
- La ampliación de una carretera existente, implica el mantenimiento del tráfico si no se puede recurrir a desvíos provisionales, pudiendo no ensanchar más que un solo lado a la vez en lugar de ambos lados derivando en mayores rendimientos.

4.2.2. Zonas arqueológicas

Si durante los cortes del terreno para carreteras en territorio guatemalteco, se encuentran rasgos culturales o vestigios arqueológicos, se debe suspender inmediatamente la excavación y comunicarlo al Instituto de Antropología e Historia, IDAEH, para que se realice el salvamento correspondiente. Dicha suspensión será por el tiempo que sea necesario, mientras se desarrollen los proyectos de investigación arqueológica.

4.2.3. Servicios

Los servicios públicos y privados existentes tales como: de telecomunicaciones, ferroviarios, de energía eléctrica, tuberías de agua potable, drenajes domiciliarios y otros; se deben retirar, cambiar, restaurar o proteger contra cualquier daño, según se indique en los planos y/o describa en las Disposiciones Especiales.

El retiro, cambio o restauración, debe efectuarse con especial cuidado y tomando todas las precauciones necesarias para que el servicio no se interrumpa, o si esto es inevitable, reducir la interrupción al mínimo de tiempo para efectuar el trabajo, a efecto de causar las menores molestias a los usuarios.

4.2.4. Estructuras

Son las casas, edificios pavimentos, aceras, puentes alcantarillas y otras estructuras existentes en el tramo carretero. Las excavaciones que queden como resultado del retiro de los cimientos o de la estructura, se deben rellenar hasta el nivel del terreno circundante, y si están dentro de los límites de un terraplén o debajo de la sub-rasante, el relleno debe ser compactado.

4.2.5. Flora y fauna

Uno de los condicionantes externos más evidentes es el grado de protección ambiental de la zona en que se ubica la carretera, cuando se decide proteger un paraje, hay dos posibles situaciones de partida: se trata de una zona no desarrollada o bien se impiden o dificultan nuevas obras, manteniendo el grado de desarrollo y de construcción existentes.

El grado de protección ambiental puede suponer:

- La dificultad o incluso la imposibilidad de contar con préstamos y vertederos.
- Eventuales limitaciones a la envergadura de las obras.
- Condicionar todas las operaciones que es preciso ejecutar en las obras.

Una preocupación permanente de las obras de infraestructura vial es conseguir la máxima integración posible al entorno, de forma que se minimice su impacto ambiental, principalmente en regiones montañosas, minimizando el derrame de rocas y escombros por causa de las voladuras.

Las obras de infraestructura de la carretera suelen provocar tres impactos principales: impacto visual, afección a las aguas de escorrentía y afección a la población y fauna locales por el efecto barrera.

Los remedios contra el impacto visual son la minimización de la altura de las obras (siempre dentro de lo posible) y un empleo adecuado de la vegetación.

Contra la afectación a las aguas de escorrentía deben respetarse al máximo los cursos de agua existentes y disponer capacidades de desagüe adecuadas; pueden tomarse además medidas para decantar las agua que llegan desde la plataforma (para aumentar la calidad de las aguas y prevenir la contaminación de los acuíferos) o emplear la vegetación y otros tratamientos para disminuir la erosión.

El objetivo principal de la infraestructura vial es prestar a los ciudadanos un servicio de calidad que contribuya a satisfacer sus necesidades de movilidad, que sea un adecuado soporte de las actividades económicas, con un grado de integración ambiental adecuado, es decir, que proporcione accesibilidad.

4.3. Identificación de la voladura

En la apertura o ampliación de carreteras es frecuente el empleo de explosivos para la voladura de roca. La gran longitud de tramo, las cambiantes condiciones de geometría así también como las propiedades de la roca a extraer a lo largo del trazo de las obras viales, imponen que el diseño de cada voladura sea un caso particular, adaptándose al perfil del terreno, denominándoseles por ello “métodos viales”, entre los que puede considerarse:

- Cortes de ladera o a media ladera, con taladros cortos y largos.
- Cortes de trincheras (o cortes de montura).
- Voladura para zanjas.
- Voladura para eliminación de raíces y troncos.

En las voladuras con métodos viales se trabaja con pequeños diámetros, entre 51 y 87 milímetros (2 y 3 ½ pulgadas), normalmente taladros con perforadoras de oruga con martillo de cabeza (*Trackdrills*) y operaciones mediante martillos de mano, de 32 a 40 milímetros de diámetro.

Los equipos como el *Trackdrills* y martillos de mano, permiten mejor adaptabilidad a los perfiles irregulares del terreno, mejor distribución del explosivo y menor nivel de vibración, por lo tanto menos daño a la roca remanente.

Si se presenta roca suelta demasiado grande para poder ser desplazada con el equipo mecánico disponible, entonces se impone el apoyo posterior para rotura secundaria, ya sea con cargas dirigidas o martillos rompedores hidráulicos.

4.4. Identificación de roca y estacionamientos

En el juego de planos y secciones transversales del proyecto, deben de identificarse claramente los tramos en los cuales será necesaria la extracción de roca. En campo los estacionamientos para la extracción deben ser marcados con estacas identificadas de manera uniforme para evitar errores, estas estacas serán colocadas a partir del replanteo topográfico necesario para la excavación.

A lo largo del trazo de la carretera se encontraran diferentes estacionamientos en los cuales la dureza de la roca será variable, esta dureza obligara al uso de explosivos para su fragmentación y extracción. La dureza y cohesión de las rocas dependen de los enlaces entre moléculas constituyentes, en general, la dureza aumenta con la densidad. La dureza se entiende como la resistencia al corte y penetración que presentan las rocas a la perforación, en la práctica se ha hecho común emplear el término para indicar su comportamiento en la voladura, pudiendo ser duras, intermedias y blandas como lo enmarca la clasificación de *Protodiakonov* (tabla XIV).

Tabla XIV. **Clasificación de rocas por su dureza relativa escala de Protodiakonov**

Categoría	Grado de dureza	Tipo de roca	Coefficiente de Dureza	Peso volumétrico (Ton/m³)	Coefficiente de expansión
I	Extremadamente duras, altamente tenaces	Cuarcitas y basaltos muy duros y densos	20	2,80 a 3,00	2,20
II	Muy duras y tenaces	Granitos muy duros, frescos, pórfidos	15	2,60 a 2,70	2,20
III	Duras, tenaces	Granito compacto y rocas graníticas (ácidas), calizas y areniscas muy duras, conglomerados cementados, minerales de hierro compactos, andesita, gneiss	10	2,50 a 2,60	2,20
IV	Duras, con tenacidad intermedia	Calizas duras, granito blando, areniscas duras, mármol duro, dolomitas	8	2,50	2,20
V	Relativamente duras, intermedias	Arenisca común, minerales de hierro. Esquistos arcillosos y arenáceos, pirita, filita	6	2,50	2,00
VI	Dureza media, tenacidad intermedia y baja	Esquisto arcilloso duro, arenisca dura, calcita, conglomerado blando	4	2,80	2,00
VII	Semiduras, intermedias a friables	Diferentes tipos de esquistos no duros, caliza	3	2,50	1,80
VIII	Blandas, friables, terrosas, sueltas	Arcilla compactada, hulla	1	1,80	1,30 a 1,40
		Grava, arena, sueltos	0,80		
		Loes (acarreo aluvial), turba	0,5		
IX	Movedizas	Detritos, suelos aguados	0,3	---	---

Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 57.

Sin embargo es realmente la propiedad de “tenacidad” de la roca la que describe las características de resistencia a la rotura, aplastamiento o doblamiento de la misma, es por esto que debe procurarse el empleo de términos como: tenaces, intermedia y friables para identificar su verdadero comportamiento ante los explosivos (tabla XV).

Tabla XV. **Clasificación generalizada de rocas para voladura**

Tenaces	Intermedias	Friables
Gneiss	Riolita	Rocas alteradas varias
Granito-gabro	Andesita	Serpentina
Aplita	Dacita	Yeso-anhidrita
Sienita-monzonita	Traquita	Pizarra-filita
Diorita-granodiorita	Fonolita	Lutita-arcilla compactada
Basalto-dolerita	Obsidiana (vidrio volcánico)	Conglomerado y brecha no compactada
Norita	Toba y brecha volcánica	Carbón-antracita
Caliza silicificada	Arenisca cementada	Marga
Cuarcita- <i>Chert</i>	Pizarra metamórfica	Caliza ligera
Hematina silícea - <i>hornfeld</i>	Caliza-dolomita	Travertino
Minerales de hierro densos (magnetita-pirrotita)	Mármol-baritina	Arenisca
Andesita-dacitas frescas	Conglomerado cementado	Pómez-tufita
Pórfidos duros: <i>dikes</i> y lamprófidios duros y densos	Pórfido de cobre	Minerales de hierro
Cuarzo con oro-wolframio	Minerales de cobre, plomo, zinc y estaño	Suelos compactados

Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 58.

Las rocas no son homogéneas ni isotrópicas; una misma formación rocosa de aspecto homogéneo varía en sus rasgos identificables de micro estructura, campos de fatiga, contenidos de agua y otros parámetros, variando su comportamiento en voladura a veces de manera sorprendente.

El contenido de agua en las rocas puede ser variable en cuanto a su volumen y localización influyendo en la absorción de la energía de la explosión, lo que puede mejorar o deteriorar la rotura. Otros dos parámetros en estrecha relación con la variabilidad son la textura y la estructura.

La textura se refiere al tamaño, forma, distribución clasificación y amarre de los cristales en las rocas ígneas y de los granos en las sedimentarias o metamórficas, así como las propiedades físicas resultantes a caracteres mayores como la estratificación, grietas, fallas y planos de clivaje, incluyendo la morfología del yacimiento, su rumbo y buzamiento. En muchos casos de voladura el patrón estructural de la roca ejerce un mayor control sobre la fragmentación resultante.

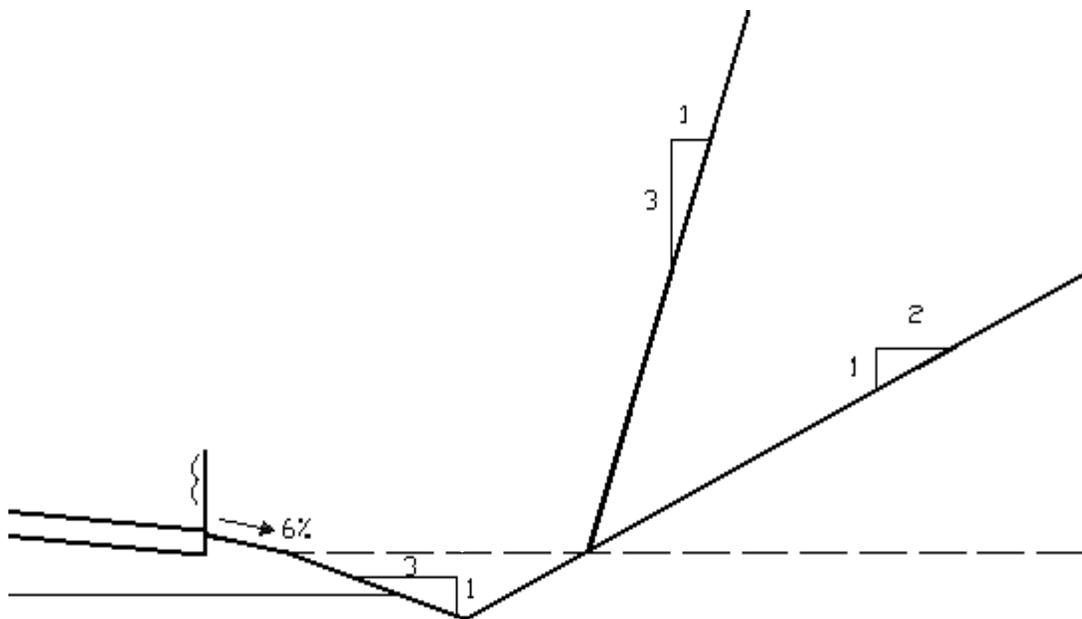
Los planos de estratificación influyen en la fragilidad de la roca, es una ventaja cuando están muy cercanos porque pueden emplearse explosivos poco densos y lentos, mientras que si son escasos o están muy separados tienden a producir grandes cantos o bolones que pueden exigir una posterior voladura secundaria. Los planos de estratificación muy separados o en ángulo pueden indicar la necesidad de cebados múltiples (cargas espaciadas) o axiales.

4.5. Especificación de taludes

La inclinación de los taludes depende de su altura, de la naturaleza y de las características del material excavado.

En taludes con presencia de roca, influyen la disposición geométrica de las juntas, su espaciamiento, su relleno y su apertura: los taludes rocosos van de la práctica verticalidad en casos muy favorables 1H:3V, hasta 2H:1V en casos desfavorables (figura 6).

Figura 6. **Taludes típicos en obras de carreteras para cortes en roca**



Fuente: KRAEMER, Carlos; PORTILLO, José María. Ingeniería de Carreteras Volumen II. p. 7.

Los taludes de gran altura (altura mayor a 20 metros), deben ser más tendidos a medida que su altura aumenta dado el mayor riesgo de inestabilidad, lo ideal es disponer de distintos taludes para diferentes materiales en un mismo corte.

4.6. Cortes a media ladera y trincheras

Estos cortes a media ladera y en trinchera son típicos en carreteras y autopistas, es normal que se efectúen de una sola vez cuando la altura del corte se limita a 10 ó 12 metros, y por etapas cuando es mayor.

Cuando el diámetro del barreno esta en relación con la altura de corte se requiere la relación:

$$\varnothing_b = (H/60)$$

Donde:

\varnothing_b : es el diámetro del barreno (cm)

H : es la profundidad de la excavación (pulgadas)

La longitud de los barrenos (L) depende de la altura del corte, de la sobre perforación que sea necesario según la resistencia a rotura de la roca y de la inclinación de los mismos, que suele ser de 15 a 20 grados.

$$L = (H/\cos\alpha) + [(1-(\alpha/100))\times SP]$$

Donde:

L : Longitud de barrenos (m)

α : Ángulo con respecto a la vertical, en grados (°)

H : Profundidad de la excavación (m)

SP: Sobre perforación (m), en equivalentes a diámetro en metros (\varnothing), de acuerdo a la resistencia de la roca (tabla XVI)

Tabla XVI. **Parámetros de barrenos en equivalencia de diámetro**

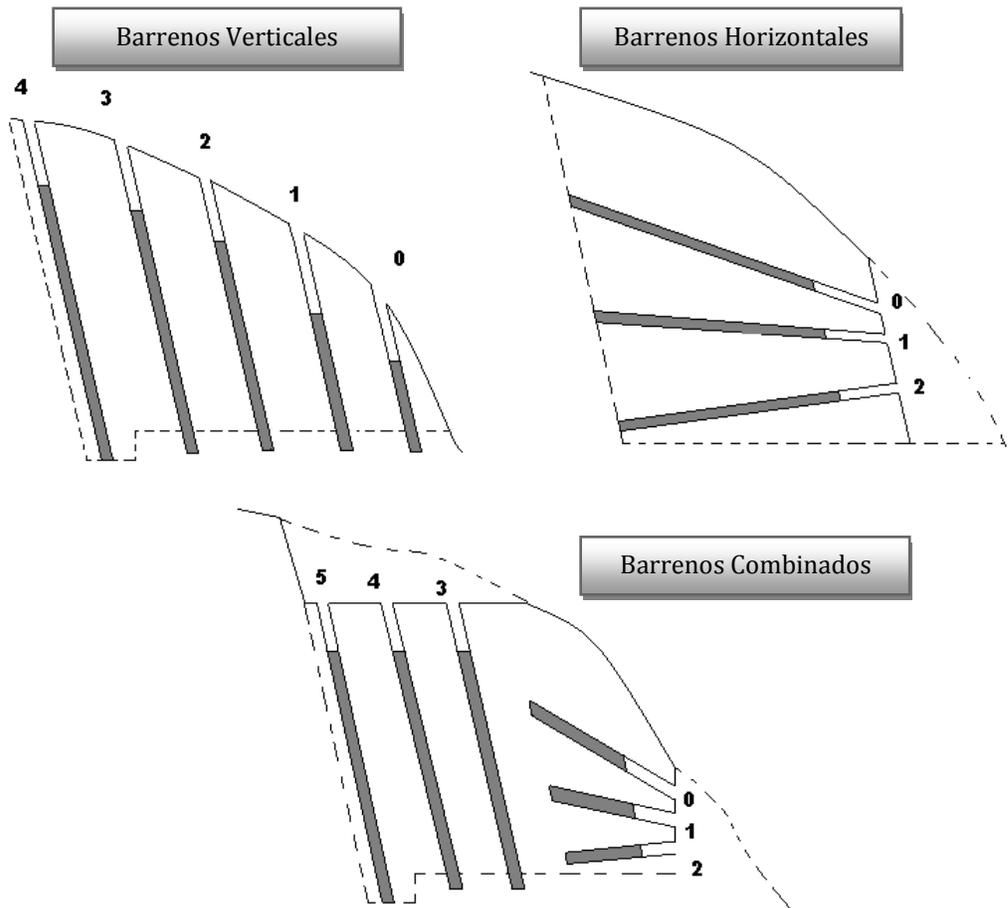
Parámetros	Tipo de roca			
	Blanda	Media	Dura	Muy dura
Resistencia a la compresión, en MPa	70	70 a 120	120 a 180	180
Sobre Perforación	10 Ø	11 Ø	12 Ø	12 Ø
Longitud recomendada para carga de fondo y taco inerte				
Carga de fondo	30 Ø	35 Ø	40 Ø	46 Ø
Taco	35 Ø	34 Ø	32 Ø	30 Ø
Bordo ó Burden	39 Ø	37 Ø	35 Ø	33 Ø
Espaciado	51 Ø	47 Ø	43 Ø	38 Ø
Relación E/B	1,25	1,20	1,15	1,15
Consumo específico (kg/m ³)	0,30	0,35	0,42	0,49

Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 249.

4.6.1. Cortes a media ladera

Se efectúan mediante barrenos verticales paralelos o en abanicos, mediante barrenos horizontales o mediante una combinación de horizontales y verticales (figura 7), los trazos de perforación son similares a los de banqueo, con malla cuadrada o alterna y salidas en paralelo o en V.

Figura 7. **Perfiles típicos para cortes a media ladera**



Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 251.

La dirección de salida de la voladura puede ser paralela o perpendicular al rumbo o traza de la cara del talud. Si es perpendicular (normal) puede existir riesgo de rodadura incontrolada de piedras ladera abajo, si la pendiente pronunciada.

En laderas elevadas se debe habilitar caminos de acceso y plataformas de trabajo (bancos), utilizando equipo de perforación con taladros de pequeño diámetro, preferentemente horizontales, paralelos a la traza y un número suficiente como para dejar preparadas plataformas de trabajo de 5 a 10 metros de ancho, desde donde se practicarán las perforaciones mayores para el corte de la ladera.

Las plataformas de trabajo se preparan en varias etapas de perforación, disparo y limpieza, generalmente con tractor. De acuerdo a las condiciones del terreno será conveniente o necesario delimitar la excavación del corte con una hilera de precorte.

En voladuras con solo taladros verticales se suele disparar en una sola etapa, como en banqueo, procurando adecuar la carga explosiva para conseguir un empuje del material arrancado semejante al que se obtiene con las voladuras de máximo desplazamiento lo que disminuirá el volumen de trabajo en el corte mismo.

En los disparos con taladros horizontales se aprovecha la gravedad para bajar la parte superior de la carga a excavar, debiéndose tener en cuenta que esta quedara *in situ*, con menor desplazamiento que en el anterior. Este método baja los costos de disparo pero incrementa los de limpieza, además presenta el inconveniente de fuerte proyección de fragmentos a distancia al actuar las cargas como en voladuras de cráter y que la pared remanente queda con rocas colgantes y en algunas ocasiones con taludes invertidos.

Para el cálculo de espaciado con taladros horizontales se aplica la relación:

$$E = 3 \times [\sqrt{(\emptyset \times L)}]$$

Donde:

E: Espaciado, (m)

\emptyset : Diámetro de barreno, (m)

L: Longitud de barreno, (m)

Si la altura del banco es inferior a 5 metros solo se utilizara una fila de barrenos, dos filas de entre 5 y 8 metros, dispuestos preferentemente en forma alterna tres o mas filas por encima de 8 metros, con malla alterna o cuadrática, según el estado del terreno.

En las voladuras en donde se combinan barrenos horizontales y verticales; suele ser conveniente efectuar la excavación por fases, limpiando el corte del primer tiro antes de disparar el segundo.

Si tiene que efectuarse un solo disparo, debe darse salida primero a los horizontales ubicados al pie del corte y después a los verticales perforados desde la parte superior y situados por detrás del fondo de los horizontales. Las salidas serán entonces mediante retardos.

4.6.2. Cortes en trinchera

Siempre se efectúan con barrenos verticales, y según sea la relación H/D, pueden presentarse dos casos:

- Si $H > 100 \varnothing$, que es el normal para alturas de banco de 10 a 12 metros, los valores para Burden y espaciamiento son los mismos mostrados en la tabla XVI.
- Si $H < 100 \varnothing$ el Burden se calcula con la expresión:

$$B = [Q/[E/B) \times (H/\text{Cos } \alpha) \times (C_e)]^{0.5}$$

Donde:

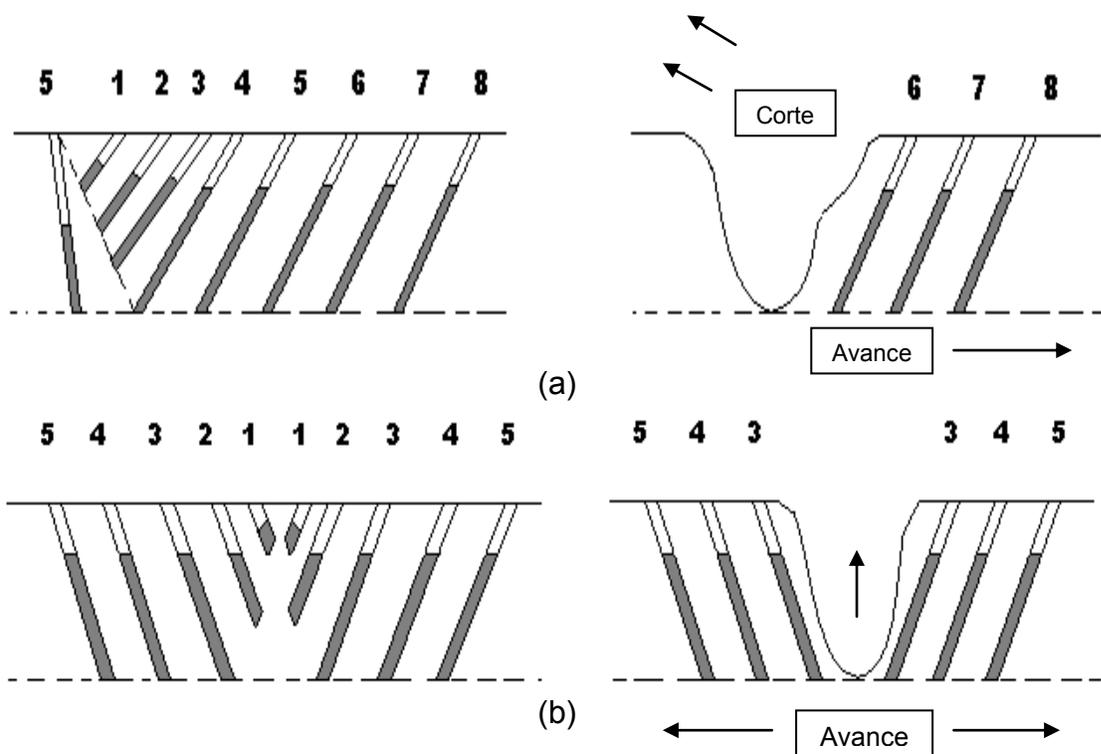
- Q : Carga total por barreno (Kg)
- H : Altura de banco (m)
- E/B: Relación entre espaciamiento y burden (tabla XVI)
- Ce : Consumo específico de explosivos (tabla XVI)
- α : Ángulo respecto a la vertical, en grados(°)

Los trazos de voladura mas utilizados cuando se tienen cara libre son, de salida por filas paralelas y los de salida en V, con barrenos distribuidos en malla alterna y cuadrangular, en forma similar a los bancos, pero con la diferencia que los barrenos tendrán diferentes profundidades, de acuerdo al perfil del terreno y al nivel de explanación que se requiere conseguir.

Cuando no se cuenta con una cara libre para iniciar la trinchera, se debe preparar primero una excavación al piso mediante un disparo de barrenos de pequeño diámetro dispuestos en abanico (figura 8 a).

La excavación una vez limpiada servirá de cara libre para avanzar con el corte de trincheras por un sentido. Si la excavación inicial se ubica en un punto central se podrá avanzar la trinchera en ambos sentidos, en este caso la excavación suele denominarse tiro de hundimiento sin cara libre (figura 8 b).

Figura 8. Trazos para cortes en trincheras viales

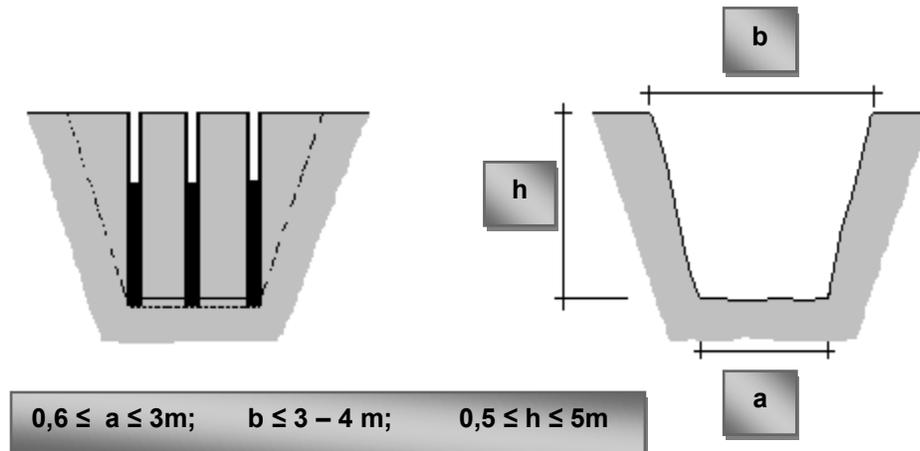


Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 253.

4.7. Voladura para zanjas

Se denomina zanja a aquella obra lineal de superficie con una anchura comprendida entre 0,6 y 3 metros y una profundidad entre 0,5 y 5 metros (Figura 9), cuando se exceden estas dimensiones se considera entonces como un corte en trinchera y no una voladura para zanja.

Figura 9. **Excavación de una zanja mediante voladura**



Fuente: VIDES TOBAR, Amando. Construcción de Carreteras Volumen 2. p. 859

La ejecución de carreteras lleva consigo la construcción de zanjas por medios manuales, mecánicos y voladuras cuando aparece roca con dureza que lo amerite. La excavación de zanjas mediante las técnicas que utilizan explosivos, presentan una serie de singularidades que obligan a modificar los criterios generales de diseño de las voladuras y a adaptar las mismas, a la naturaleza de roca que aparece.

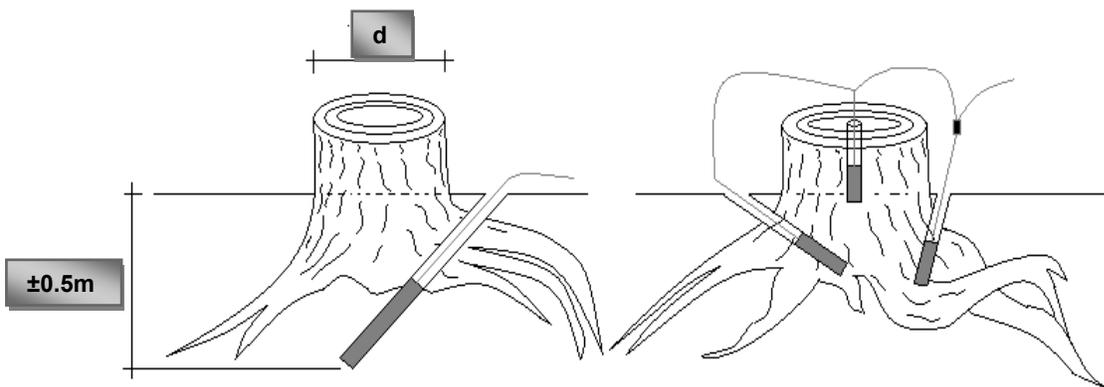
Los criterios de diseño de este tipo de obras están impuestos por la finalidad de los mismos, las excavaciones difieren de los sistemas convencionales en dos aspectos básicos: el requerimiento de una menor perforación y un consumo más elevado de explosivo.

El aumento de la carga de explosivo se debe a que la roca está más confinada y sin superficies libres de salida, lo que obliga a un mayor consumo específico que en las voladuras de trinchera o media ladera.

4.8. Voladura para eliminación de raíces y troncos

Las raíces y troncos de árboles que obstruyan la construcción de una obra vial, pueden ser eliminados con explosivos, aplicándolos de dos maneras: con cargas regulares ubicadas bajo las raíces, o con cargas pequeñas introducidas en el tronco y raíces más gruesas (figura 10).

Figura 10. **Métodos para eliminación de raíces y troncos**



Fuente: VIDES TOBAR, Amando. Construcción de Carreteras Volumen 2. p. 861.

Para este trabajo se debe tener en cuenta algunos parámetros:

- El diámetro del tronco d
- La edad y especie de árbol
- La naturaleza del subsuelo
- La distancia máxima permisible para proyecciones

Las cargas bajo las raíces son generalmente de 0,2 a 0,3 kilogramos por cada 10 centímetros de diámetro del tronco, ubicadas normalmente a 0,5 metros debajo del centro del tronco. Esto es en madera suave y con madera fresca ya que en tierra dura se requerirá menos carga.

El método de introducción de cargas dentro del tronco es menos violento y consiste en introducir cargas pequeñas en orificios barrenados en el tronco, y en las raíces más gruesas si fuera necesario, para romperlo en trozos más fáciles de remover.

4.9. Roca suelta de gran tamaño

Cuando en la construcción de una carretera se encuentra roca suelta de tal tamaño que hace problemático su desplazamiento, con equipo mecánico y cuya dureza justifica el uso de explosivos, se utilizan cargas dirigidas para provocar la fragmentación de roca, facilitando su extracción y transporte.

5. METODOLOGÍA DEL USO DE EXPLOSIVOS PARA LA APERTURA Y AMPLIACIÓN DE CARRETERAS

5.1. Barrenación y selección de equipo de perforación

En la preparación de una voladura, la barrenación es la operación que tiene como propósito el abrir en la roca huecos cilíndricos en los cuales se colocara el explosivo y sus accesorios iniciadores.

La barrenación se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpe y fricción repetitivos producen la trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la broca y una profundidad en función de la longitud del barreno utilizado.

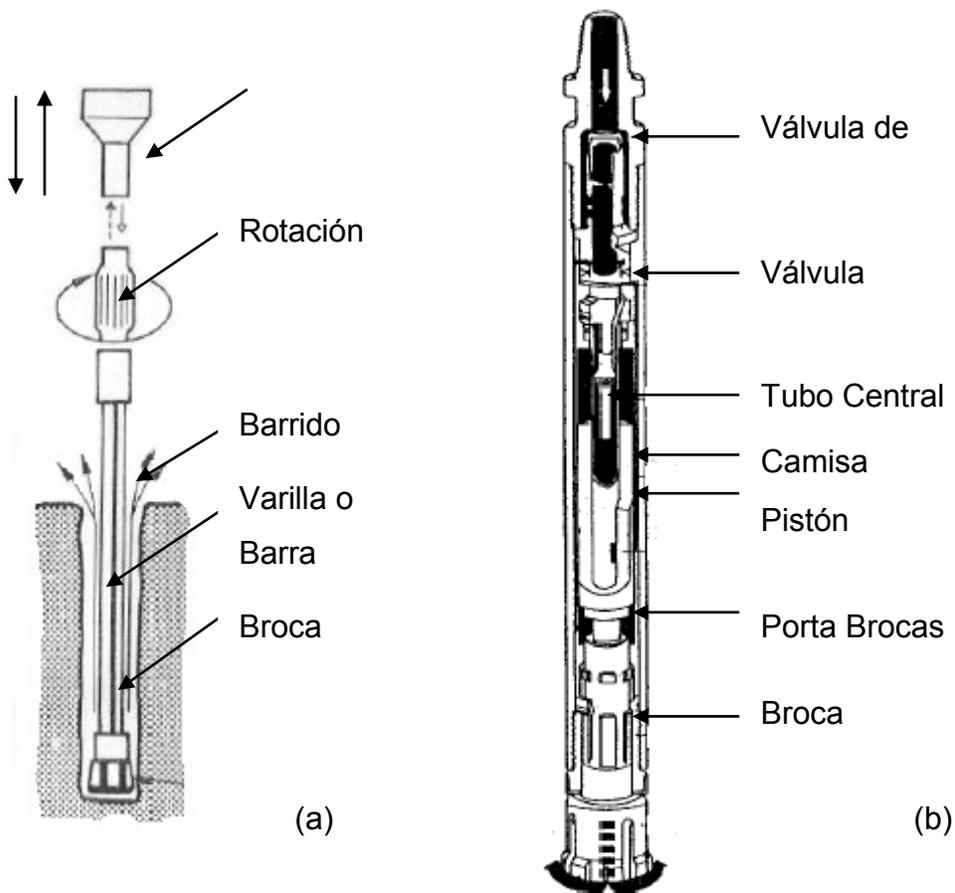
La eficiencia de la perforación consiste en lograr la máxima penetración al menor costo. La fase de barrenación es una de las más costosas, ya que requiere trabajos previos en el área de la voladura y mantenimientos frecuentes a los equipos y accesorios de perforación. Si, la barrenación es incorrecta, puede causar el aumento de costos a lo largo de las siguientes etapas del trabajo.

Actualmente las técnicas de barrenación en roca están agrupadas en:

- Métodos rotopercutivos (o percutivos), donde son utilizadas unidades de perforación como: martillos en cabeza o martillo en fondo (figura 11).

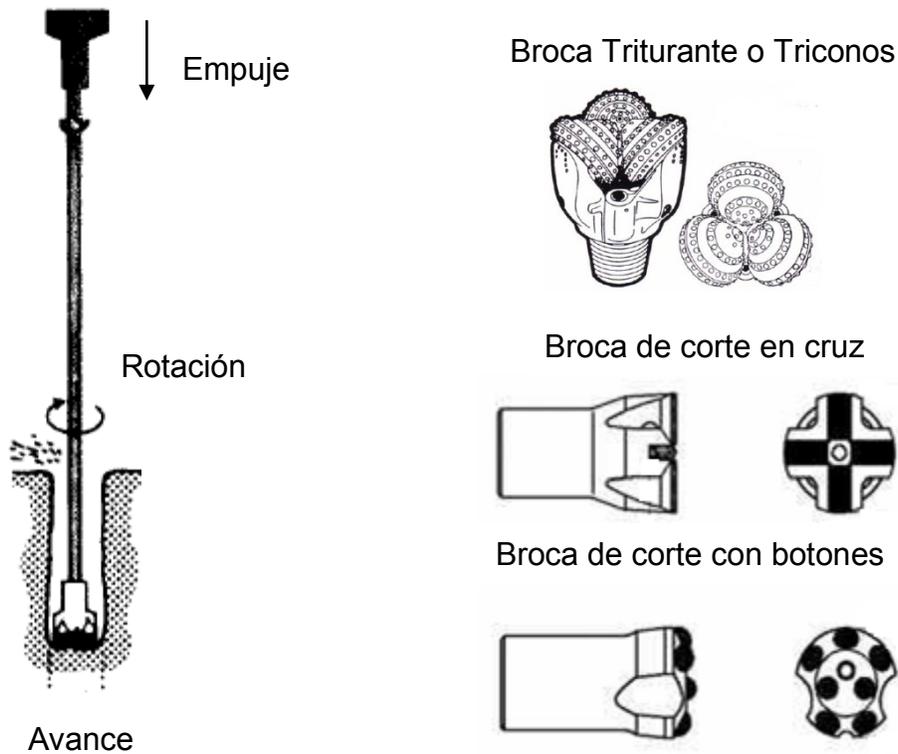
- Métodos rotativos, donde según el tipo de penetración que se desee en la roca, puede optarse por: la perforación rotativa con tricono triturante o perforación broca cortante por corte (figura 12).

Figura 11. **Unidades de perforación para métodos rotopercutivos, a) martillo en cabeza, b) martillo en fondo**



Fuente: Sociedad Internacional de Ingenieros en Explosivos. Manual del Especialista en Voladura. p. 66 y 68.

Figura 12. **Perforación con métodos rotativos, brocas triturantes y cortantes**



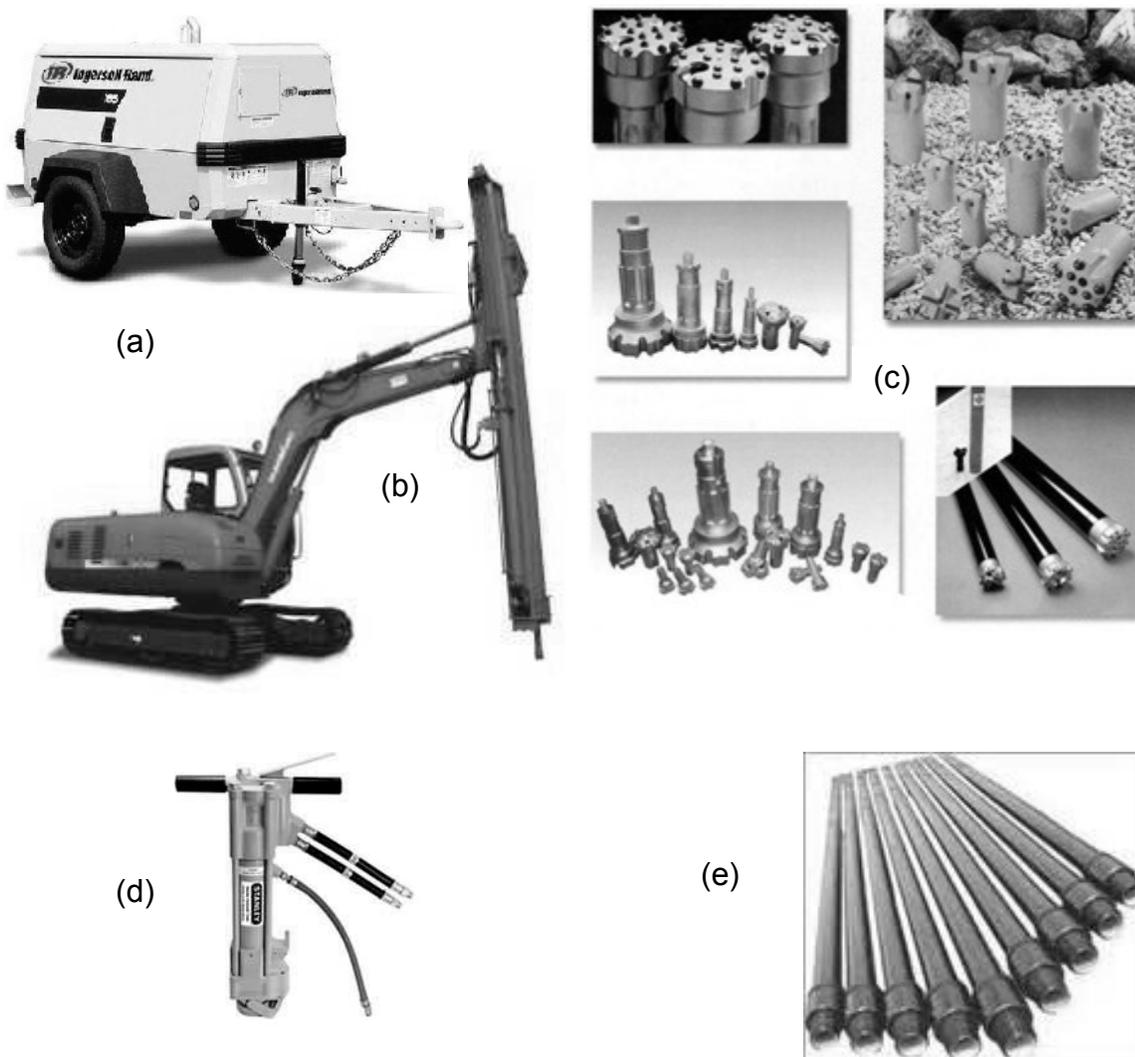
Fuente: Dirección General de Carreteras, España. Manual para el control y diseño de voladura en obras de carreteras. p. 277 y 278.

Los elementos principales de que consta un sistema de perforación son:

- La perforadora que puede ser manual o mecanizada
- Los motores generadores de energía
- El varillaje por el que se transmite el impulso mecánico
- La broca que rompe la roca

- El fluido de barrido de detritus
- El sistema de captación del polvo

Figura 13. Equipos y accesorios de perforación: a) compresor portátil, b) perforadora hidráulica, c) juego de brocas, d) martillo manual, e) varillas o barras



Fuente: *Jackwell Limited*. Catalogo de Equipo y Herramientas para Perforación. p. 17, 19, 21 y 25.

5.1.1. Selección de equipo de perforación

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

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

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

La selección del equipo para la perforación puede ser un proceso muy complejo. A menudo, no se le brinda la consideración que merece. Esto a veces puede resultar desafortunado, ya que el éxito global del proyecto u operación puede depender de la capacidad de la perforadora.

Los equipos de perforación que pueden utilizarse según el tipo de trabajo a desarrollar, el intervalo de diámetros de aplicación más frecuentes se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII. Intervalo de diámetros de perforación según aplicación

APLICACIÓN	DIAMETRO DE PERFORACIÓN	TIPO DE EQUIPOS
PERFORACIÓN DE INVESTIGACIÓN	25,40-101,60mm 1" – 4"	<ul style="list-style-type: none"> • Perforación rotativa con triconos. • Perforación rotativa con herramientas de corte. • Perforación rotopercutiva con martillo en fondo.
PERFORACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ACCESOS	19,05-88,90mm ¾" – 3 ½"	<ul style="list-style-type: none"> • Perforación rotopercutiva con martillo en cabeza, sobre orugas.
PERFORACIÓN DE TERRENOS DE RECUBRIMIENTO	76,20-254,00 mm 3" – 10"	<ul style="list-style-type: none"> • Perforación rotopercutiva con martillo en cabeza, sobre orugas. • Perforación rotopercutiva con martillo en fondo, sobre orugas. • Perforación rotativa con tricono. • Perforación rotativa con herramientas de corte.
PERFORACIÓN PARA LA EXCAVACIÓN DE GRANDES DESMONTES POR BANQUEO	38,10-254,00 mm 1 ½" – 10"	<ul style="list-style-type: none"> • Perforación rotopercutiva con martillo en cabeza, sobre orugas. • Perforación rotopercutiva con martillo en fondo, sobre orugas. • Perforación rotativa con tricono. • Perforación rotativa con herramientas de corte.

Fuente: Dirección General de Carreteras, España. Manual para el control y diseño de voladura en obras de carreteras. p. 63.

5.2. Diseño de voladuras

La voladura comprende trabajos en obras de ingeniería civil y vial, como cortes a media ladera, en trinchera, voladura para zanjas y trabajos especiales como rotura secundaria de roca suelta, eliminación de raíces y troncos, demolición de estructuras y edificios, pero fundamentalmente se concreta en bancos.

Los bancos son excavaciones similares a escalones en el terreno. Su característica principal es la de tener, como mínimo, dos caras libres, la superior y la frontal. Se pueden clasificar:

- Según su envergadura
- Por su aplicación o finalidad

5.2.1. Elementos para el diseño de voladura en bancos

Se denominan también Parámetros de Voladura, son empleados en el cálculo y diseño de disparos. Unos son invariables, como los correspondientes a las características físicas de la roca: densidad, dureza, grado de fisuramiento, coeficientes de resistencia a deformación y rotura, etc.; y otros son variables, es decir que podemos modificarlos a voluntad, de acuerdo a las necesidades reales del trabajo y condiciones del terreno.

Estos parámetros controlables se pueden agrupar en:

- Geométricos: altura, ancho y largo del banco, talud, cara libre.
- De perforación; diámetro y longitud del barreno, plantilla.

- De carga: densidad, columna explosiva, longitud del taco, características físico-químicas del explosivo.
- De tiempo: tiempos de retardo entre barrenos, secuencia de salidas de disparos.

5.2.1.1. Dimensión de la voladura

Comprende al área superficial delimitada por el largo del frente y el ancho o profundidad de avance proyectados (metros cuadrados) por la altura del banco o de corte (H), en metros cúbicos.

$$(L \times A \times H) = \text{volumen total}$$

Donde:

L: Largo, en m

A: Ancho en m

H: Altura, en m

Si desean expresarse en toneladas de material *in situ* se multiplica por la densidad promedio de la roca o material que pretende volarse.

$$(L \times A \times H \times \rho \times 0.001) = \text{masa total en toneladas.}$$

ρ : Densidad de la roca, en kg/m^3

5.2.1.2. Parámetros dimensionales

La selección del diámetro de barreno (\emptyset) es crítica considerando que afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo, también al bordo, espaciamiento distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general la eficiencia y economía de toda la operación

Para determinar el diámetro óptimo en la práctica, se consideran tres aspectos:

- La disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo proyectado.
- La altura de banco proyectada y la amplitud o envergadura de las voladuras a realizar.
- La distancia límite de avance proyectado para el banco.

El máximo diámetro a adoptar depende de la profundidad del barreno y, recíprocamente; la mínima profundidad a la que puede ser perforado un barreno depende del diámetro, lo que usualmente se expresa con la igualdad:

$$L \text{ min} = (2 \times \emptyset)$$

Donde:

L min: la mínima longitud del barreno, en pies

\emptyset : es el diámetro del barreno, en pulgadas

En forma práctica se puede determinar considerando que el diámetro adecuado expresado en pulgadas será igual a la altura de banco en metros, dividida entre cuatro:

$$\varnothing = (H/4)$$

También tiene marcada influencia en el diseño de la voladura la longitud de barreno (L), siendo un factor determinante en el diámetro, bordo y espaciamiento.

La longitud del barreno es la suma de la altura de banco más la sobreperforación necesaria por de bajo del nivel o razante del piso para garantizar su buena rotura. Esta sobreperforación (SP) debe ser por lo menos de 0,3 veces el valor del bordo, por tanto:

$$L = (0,3 \times B) + H$$

Donde:

L: Longitud de barreno, (m)

B: Bordo, (m)

H: Altura de banco, (m)

La altura del banco (H) es la distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso).

El bordo o línea de menor resistencia a la cara libre (también llamado burden) es la distancia desde el pie o eje del barreno a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de barrenos en la voladura.

El bordo se considera el parámetro más determinante de la voladura. Depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear, se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material volado que se quiere conseguir.

Se han propuesto varias fórmulas para el cálculo del bordo, que involucran parámetros de la perforación de la roca, pero todas al final señalan valores entre 25 a 40 veces el diámetro, dependientes principalmente de la calidad y resistencia de la roca.

En ocasiones se perforan barrenos inclinados, en los cuales la longitud de barreno aumenta con la inclinación pero, por lo contrario, la sobreperforación (SP) disminuye, estimándose por la siguiente relación.

$$L = (H / \cos (\alpha)) + [1 - ((\alpha / 100) \times SP)]$$

Donde:

L : longitud del barreno, (m)

H : altura de banco, (m)

α : ángulo con respecto a la vertical, en grados (°)

SP: sobreperforación, (m)

La perforación inclinada, paralela a la cara libre del banco, al mantener uniforme el bordo a todo lo largo del barreno proporciona mayor fragmentación, esponjamiento y desplazamiento de la pila de escombros, menor craterización en la boca o collar del barreno, menor consumo específico de explosivos y dejan taludes de cara libre más estables. Sin embargo, aumenta la longitud de perforación, ocasiona mayor desgaste de brocas, varillaje y estabilizadores, dificulta la carga de explosivos y tiene a desviación de los barrenos, especialmente con los mayores a 20 metros.

El taco (T) es la parte del agujero hecho por el barreno que se llena con material inerte con la función de retener a los gases generados durante la detonación, solo durante fracciones de segundo, suficientes para evitar que estos gases fuguen como un soplo por la boca del barreno, más bien deben trabajar en la fragmentación y desplazamiento de la roca en toda la longitud de la columna de carga explosiva.

$$T = (L - (SP/3))$$

Donde:

T : Taco (m)

L : Longitud del barreno (m)

SP: Sobre Perforación (m)

O igual a la longitud del bordo $T = B$

Normalmente como relleno se emplean los detritos de la perforación que rodean al barreno, arcillas o gravilla fina y angulosa, en la práctica la longitud del taco es usualmente 1/3 del largo total del barreno.

El espaciamiento (E) es la distancia entre taladros de la misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila.

En la práctica, normalmente es igual al burden para plantilla de perforación cuadrada $E = B$ y de $E = 1,3$ a $1,5 B$ para plantilla rectangular o alterna. Para las cargas de precorte o voladura amortiguada el espaciamiento en la última fila de la voladura generalmente es menor: $E = 0,5$ a $0,8 B$.

Para voladuras de filas múltiples simultáneas (igual retardo en las que el radio de longitud del barreno a bordo (L/B) es menor que 4) el espaciamiento puede determinarse por la formula:

$$E = \sqrt{B \times L}$$

Donde:

E: Espaciamiento en pies

B: Bordo, en pies

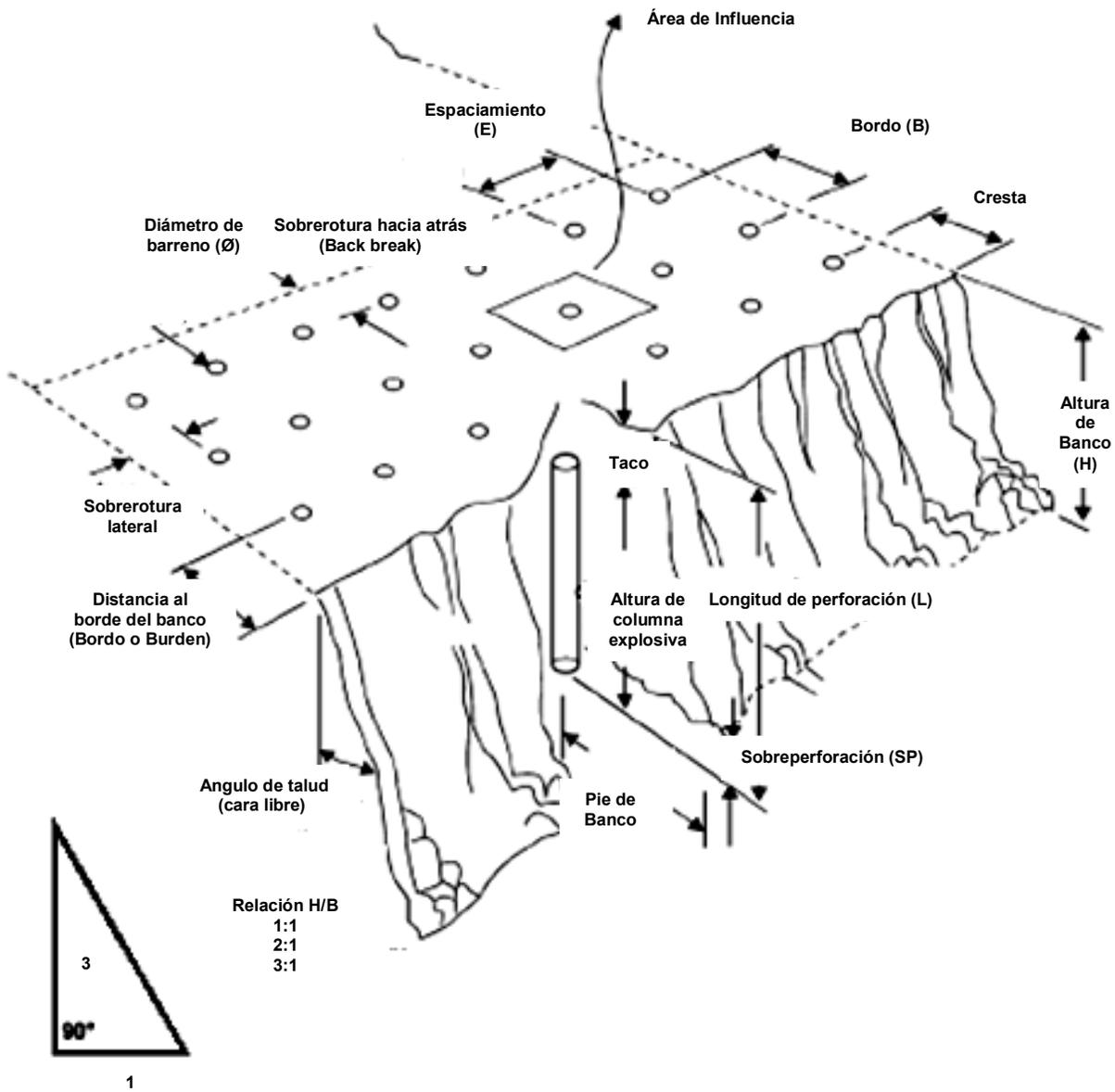
L: Longitud de barrenos, en pies

En voladura con detonadores de retardo el espaciamiento promedio es aproximadamente de:

$$E_{(\text{metros})} = (1,4 \times B_{(\text{metros})})$$

En la figura 14 pueden observarse los diferentes parámetros dimensionales en una voladura.

Figura 14. Parámetros dimensionales en banco de voladura



Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 158.

5.2.1.3. Cálculo y distribución de la carga explosiva

La columna de carga explosiva o activa, es donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes del barreno. Es importante la distribución de explosivo a lo largo del barreno, según las condiciones de la roca. Usualmente comprende de $\frac{1}{2}$ a $\frac{2}{3}$ de la longitud total y puede ser continua o segmentada.

La columna continua normalmente empleada para rocas frágiles suele ser del mismo tipo de explosivo, mientras que para rocas duras o tenaces, se divide en dos partes: la carga de fondo (CF) y la carga de columna (CC).

La carga de fondo (CF) es la carga explosiva de mayor densidad y potencia, requerida al fondo del barreno para romper la parte mas confinada y garantizar la rotura al piso, para junto con la sobreperforación, mantener la razante, evitando la formación de resaltos o lomos y también limitar la fragmentación gruesa.

Su longitud es normalmente equivalente a la del bordo mas la sobreperforación: $B + 0,3B$.

$$L_{CF} = (1,3 \times B)$$

Donde:

L_{CF} : Longitud de carga de fondo (m)

B : Bordo o Burden (m)

Si se toma en consideración la resistencia de la roca y el diámetro de la carga, la longitud de la carga de fondo (metros), variara entre 30 veces el diámetro para roca fácil a 45 veces el diámetro, para muy dura.

$$30\varnothing < L_{CF} < 45\varnothing$$

El valor de la longitud de carga de fondo, no debe ser menor de 0,6 veces el bordo para que su tope superior este al menos al nivel del piso del banco.

La carga de fondo, se expresa en kilogramos de explosivo, tomando en cuenta que la energía por unidad de longitud en el fondo del barreno debe ser al menos dos veces mayor que la requerida para romper la roca en la parte superior.

$$CF = L_{CF} \times Q_{CF}$$

Donde:

CF : Carga de Fondo (kg)

L_{CF} : Longitud de Carga de Fondo (m)

Q_{CF} : Concentración de Carga de Fondo (kg/m)

La carga de columna (CC) se ubica sobre la carga de fondo y puede ser de menos densidad, potencia o concentración ya que el confinamiento de la roca en este sector del barreno es menor, empleándose normalmente ANFO convencional, o ANFO pesado en relaciones de 10/90 a 20/80.

La longitud de la carga de columna se calcula por la diferencia entre la longitud del barreno y la suma de la longitud de la carga de fondo más el taco.

$$L_{CC} = L - (L_{CF} + T)$$

Donde:

L_{CC} : Longitud de carga de columna (m)

L : Longitud de barrenos (m)

L_{CF} : Longitud de carga de fondo (m)

T : Longitud del Taco (m)

Usualmente $L_{CF} = 2,3 \times B$

La carga de columna (CC) al igual que la carga de fondo (CF), se expresa en kilogramos de explosivo, siendo resultado de la multiplicación entre la longitud de la carga de columna por la concentración del explosivo en dicha longitud.

$$CC = L_{CC} \times Q_{CC}$$

Donde:

CC : Carga de Columna (kg)

L_{CC} : Longitud de Carga de Columna (m)

Q_{CF} : Concentración de Carga de Columna (kg/m)

Normalmente se emplean cargas continuas en taladros de pequeña o mediana longitud, pero en taladros largos o en aquellos que se requiere disminuir la energía pero manteniéndola distribuida en toda su longitud, se emplean cargas espaciadas con tacos inertes intermedios y con un iniciador en cada una para garantizar su salida. Estas cargas pueden ser del mismo tipo de explosivo o emplearse uno de mayor densidad o potencia en la primera carga de fondo.

La carga específica (CE) también llamada Consumo Específico o Factor de Carga, es la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 metros cúbicos de roca. Se expresa en kilogramos por metros cúbicos.

$$CE = \frac{\text{kg de explosivo por barreno}}{\text{Espaciamiento (m) x Bordo (m) x Altura de Banco (m)}} = \text{kg/m}^3$$

Usualmente se determina con base en la cantidad de explosivo utilizado por metro cúbico de roca volado en varios disparos, incluso diferenciando varios tipos de roca, considerando valores promedio para el cálculo de los disparos subsiguientes. En voladura, la cantidad de explosivo utilizado deberá ser muy próxima a lo mínimo necesario para desprender la roca.

Menos carga significa tener una voladura deficiente y, por el contrario, un exceso de carga significa mayor gasto y mayores riesgos de accidentes, debiéndose tenerse en cuenta que el exceso de carga colocado en el barreno origina una proyección cuya energía es proporcional a dicho exceso por metro cúbico, estimándose que el centro de gravedad de la masa de la voladura podría desplazarse varios metros hacia adelante por cada 0,1 kilogramo por centímetro cuadrado de exceso de carga, siendo aun mayor el riesgo de proyección de trozos pequeños a distancias imprevisibles.

Tomando en cuenta esto y considerando los conceptos definidos en párrafos anteriores podemos trazar un camino para el cálculo de estimaciones de carga:

- Volumen a romper por barreno:

$$V = B \times E \times H = m^3 \text{ por barreno}$$

- Volumen de explosivo: es el área del agujero del barreno por la longitud de la columna explosiva:

$$V_e = \varnothing^2 \times (L_{CF} + L_{CC}) = m^3 \text{ de explosivo}$$

Donde:

\varnothing : Diámetro del barreno (m)

L_{CF} : Longitud de la Carga de Fondo (m)

L_{CC} : Longitud de la Carga de Columna (m)

- Factor de carga: siendo la relación entre el masa del explosivo utilizado y el volumen de material roto;

$$FC = (M_e / V) = \text{Kg/m}^3$$

- Tonelaje roto: el tonelaje roto es igual al volumen del material roto multiplicado por la densidad de dicho material;

$$\text{Tonelaje} = (V \times \rho_r) = \text{Ton.}$$

ρ : expresada en Ton/m³

- Carga específica para cada barrenos en voladura de varias hileras:

Para la cara libre frontal inicial;

$$CE = (H - SP) \times E \times (B + T/2) \times FC = \text{Kg}$$

Para la segunda fila y subsiguientes;

$$CE = (H - SP) \times E \times B \times FC = \text{Kg}$$

Donde:

CE: Carga explosiva específica (kg)

H : Profundidad de taladro (m)

SP: Sobreperforación (m)

E : Espaciamiento entre barrenos (m)

B : Bordo o Burden (m)

T : Taco (m)

FC: Factor de carga en Kg/m³ (por tipo de roca, tendrá que definirse para cada caso en especial)

- Factor de perforación (FP):

$$FP = (H^2 \times E) / B = \text{m/m}^3$$

Donde:

H: Altura del banco (m)

B: Bordo o Burden (m)

E: Espaciamiento (m)

- Carga del barreno:

$$(0,34 \times \emptyset^2 \times pe), \text{ en lb/pie}$$

Donde:

0,34: Factor

\emptyset : diámetro del barreno, en pulgadas

pe : Densidad del explosivo a usar, en g/cm³

- Densidad de carga:

$$Dc = (0,57 \times pe \times \emptyset^2) \times (L - T) = \text{kg por barreno.}$$

Donde:

0,57: Factor

\emptyset : diámetro del barreno (pulgadas)

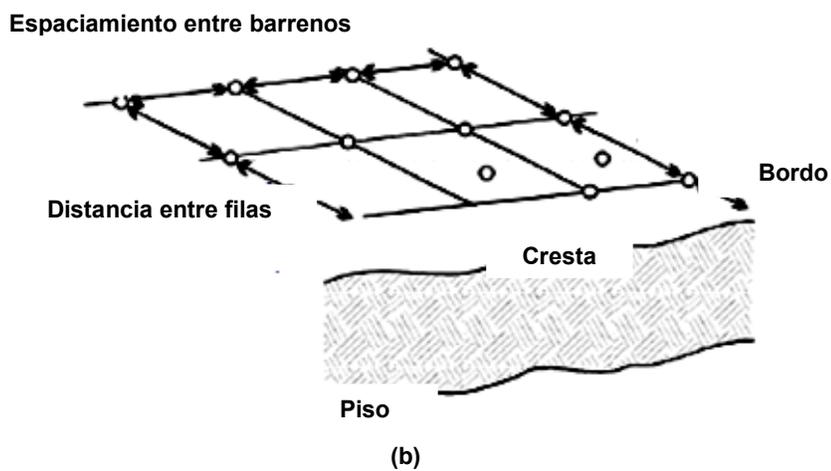
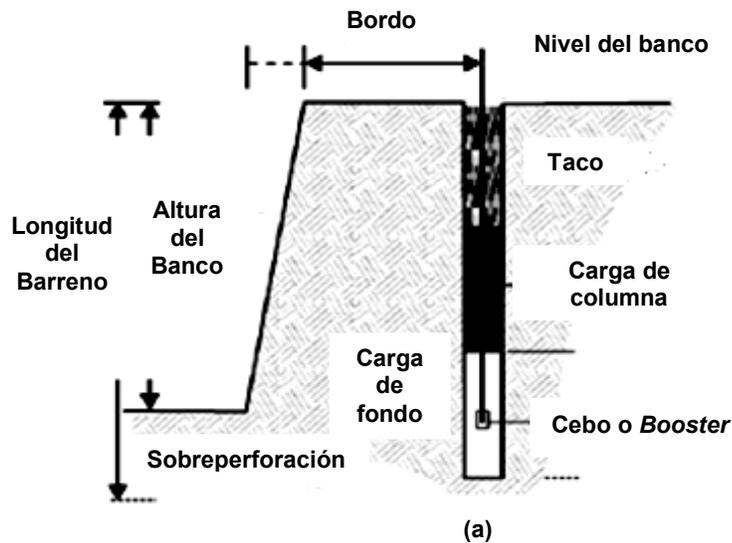
pe : densidad del explosivo a usar (Ton/m³)

L : Longitud de perforación (m)

T : Taco (m)

En la figura 15 se puede observar la distribución de las cargas dentro del barreno.

Figura 15. **Distribución de carga explosiva, a) distribución de carga dentro del barreno, b) plantilla o malla de barrenación**



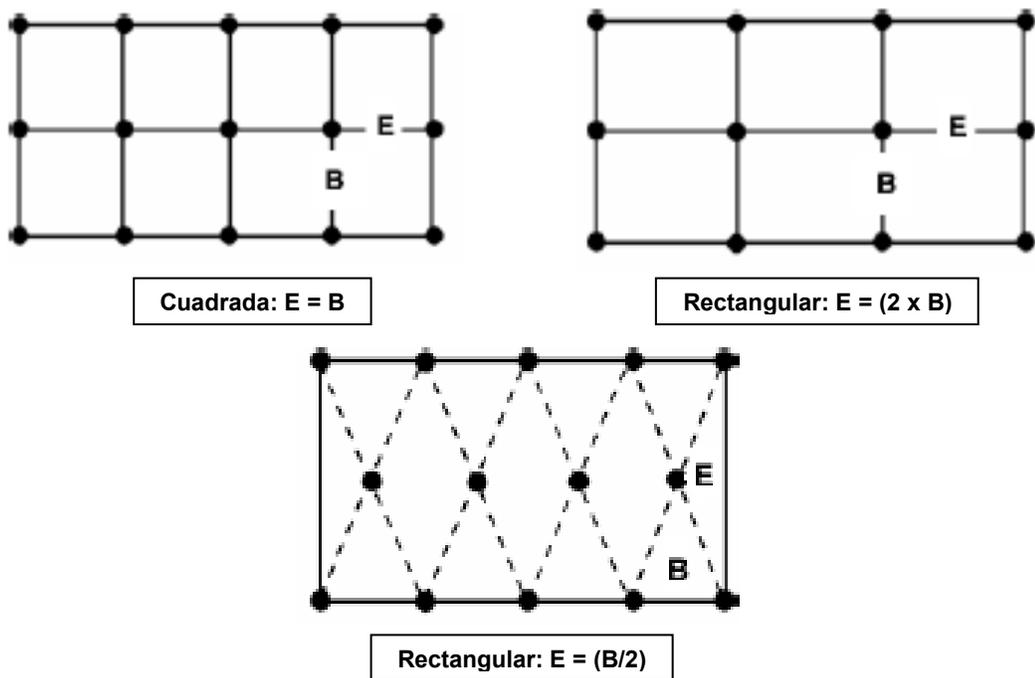
Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 160.

5.3. Plantilla de barrenación o malla

La plantilla de barrenación o malla es la forma en la que se distribuyen los barrenos de una voladura, considerando básicamente a la relación de bordo y espaciamiento y su directa vinculación con la profundidad de barrenos.

En el diseño de una voladura de banco, media ladera, en trinchera u otras se pueden aplicar diferentes trazos para la perforación, denominándose malla cuadrada, rectangular y triangular o alterna, basándose en la dimensión del bordo (figura 16).

Figura 16. Plantillas de perforación

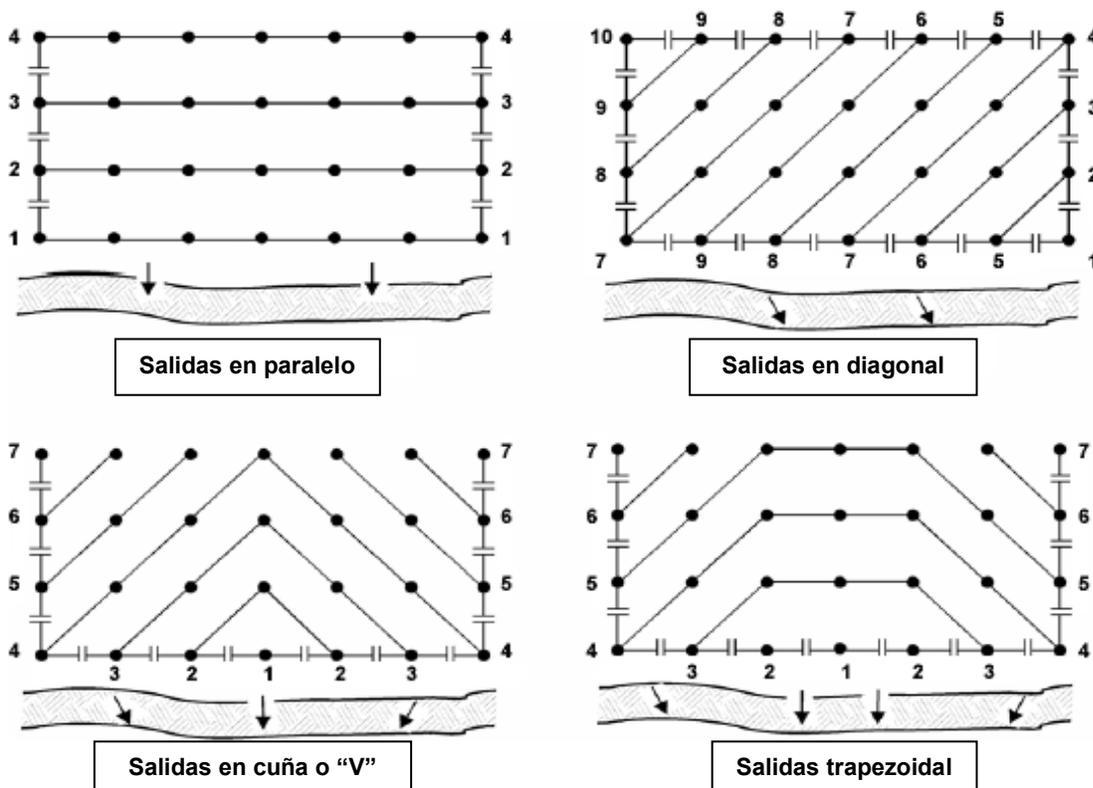


Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 163.

Distintas formas de amarre de los accesorios y diferentes tiempos de encendido de los barrenos se aplican para obtener la más conveniente fragmentación y forma de acumulación de detritos, para las posteriores operaciones de carga y transporte del material volado.

Los diseños de amarre de las conexiones entre barrenos de los trazos de perforaciones, determinan el diseño de mallas de salida, siendo las más empleadas la longitudinal, cuña, diagonal trapezoidal y las combinadas (figura 17).

Figura 17. Mallas de salida



Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 163.

Donde existen condiciones de roca dura superficial, se pueden agregar barrenos auxiliares a cualquier malla de perforación. Estos consisten en barrenos cortos perforados solo con la profundidad suficiente para alcanzar la base de la capa dura. Se barrenan en filas separadas, equidistantes de los barrenos más cercanos de profundidad estándar. La carga explosiva para estos barrenos, por lo general, se limita para evitar problemas de rocas volantes.

5.4. Circuitos de voladura

Para voladura, los detonadores eléctricos se conectan entre si formando circuitos que se une a la fuente de energía (explosor) mediante los cables de la línea de tiro. Las conexiones pueden hacerse en: serie, paralelo, serie-paralelo y paralelo serie.

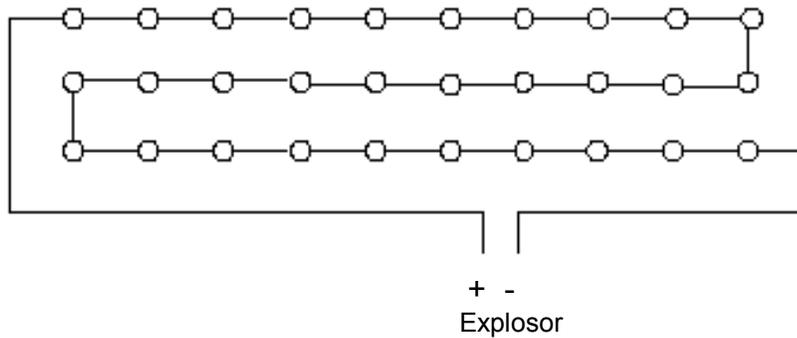
5.4.1. Conexión en serie

En este sistema toda la corriente de encendido fluye directamente a todos los detonadores en un solo sentido, cada detonador se conecta al anterior y al siguiente mediante las dos terminales.

Los diferentes colores de aislamiento de los dos hilos reducen la posibilidad de errores en las conexiones. Los extremos libres del primero y último detonador de la serie se conectan a la línea de volante y esta a la línea de tiro principal.

Es conveniente que la línea de tiro permanezca cortocircuitada por el otro extremo, hasta el momento de realizar la comprobación del circuito y su posterior conexión al explosor.

Figura 18. **Conexión en serie de barrenos**



Fuente: elaboración propia.

La resistencia total teórica de ésta conexión que debe coincidir con la resistencia real medida en el óhmetro será:

$$R = R_L + (N \times R_p) + (2 \times m \times N \times 0,065)$$

Donde:

- R : Resistencia total de la voladura (Ohmios)
- R_L : Resistencia de la línea de tiro (línea principal + línea volante) (Ohmios)
- N : Número de detonadores
- R_p : Resistencia media del puente del detonador empleado (Ohmios)
- m : Metraje de los hilos del detonador (metros)
- 0,065: Resistencia por metro lineal de hilo de cobre de 0,6 milímetros de diámetro usado en los detonadores

La tensión necesaria que deberá suministrar la fuente de energía será:

$$V = I_s \times R$$

Donde:

V : Tensión o Voltaje (Volt).

I_s : Corriente eléctrica (Amperios)

R : Resistencia total del circuito (Ohmios).

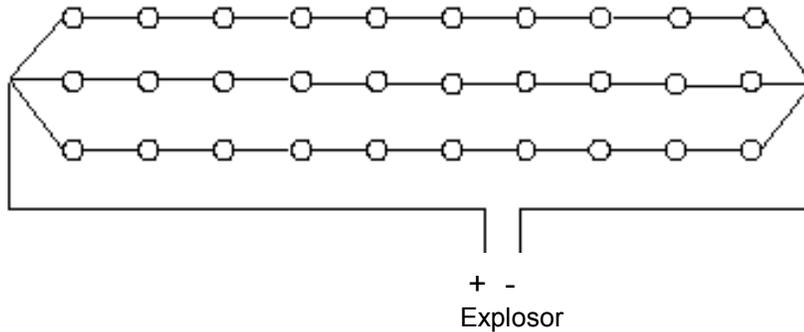
En donde, I_s es la intensidad recomendada para el encendido de detonadores en serie.

Se acepta generalmente que el amperaje mínimo para activar un circuito en serie es de 1,5 amperios con corriente directa (DC) o de 3,0 amperios con corriente alterna (AC). Para muchos casos el límite conservador es de un máximo de 50 detonadores con alambres de 24 pies (7,31 metros) por disparo. Es el mas simple y sencillo de ensamblar.

5.4.2. Conexión en paralelo

En este circuito cada detonador proporciona caminos alternos para el paso de la corriente. Se usan dos líneas de alimentación separadas (del positivo y negativo) a cada una de las cuales se empata los alambres de cada detonador formando puentes.

Figura 19. **Conexión en paralelo de barrenos**



Fuente: elaboración propia.

La conexión se realiza empalmando directamente cada detonador a la línea de tiro:

$$R = R_L + (R_D / N)$$

Donde:

R : Resistencia total (Ohmios)

R_L : Resistencia de la línea de tiro (Ohmios)

R_D : Resistencia de cada detonador ($R_p + 2 \times m \times 0,065$), (Ohmios)

N : Número de detonadores

En un circuito balanceado de series en paralelo, la resistencia de una de las series dividida entre el número de series resultará en la resistencia total del circuito.

En las conexiones en paralelo, se ha de procurar que todos los detonadores tengan la misma resistencia, mostrando una lectura con el mismo número de ohmios, pues la distribución de la intensidad es proporcional a las resistencias individuales, cada serie debe estar balanceada eléctricamente, usualmente, un mismo número de detonadores en cada serie producirá una serie balanceada. Hay que tener también en cuenta que en este tipo de conexión, no es necesario hacer pasar por cada detonador la corriente recomendada para encendido en dado que bastará con que circule la corriente de encendido individual.

La intensidad total necesaria será:

$$I = I_1 \times N$$

Donde:

I : Intensidad total de salida (Amperios)

I_1 : Corriente de encendido (Amperios)

N: Número de detonadores

La tensión que ha de proporcionar la fuente de energía será:

$$V = R \times I$$

Donde:

V: Tensión o Voltaje (Volt)

R: Resistencia total (Ohmios).

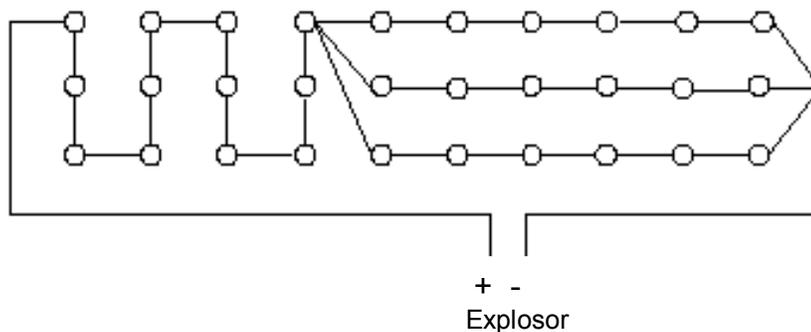
I : Corriente eléctrica (Amperios)

5.4.3. Conexiones mixtas (serie-paralelo)

Generalmente empleadas cuando el disparo excede de unos 40 detonadores con alambres de 20 pies (6 metros), demasiados para un simple circuito en serie.

El límite práctico para las voladuras en serie estaría determinado por la capacidad del explosor y por las condiciones en que se vayan a desarrollar la voladura. A partir de este límite, se debe elegir una voladura de tipo mixto, siendo la mas utilizada la conexión de series en paralelo, que evita las grandes resistencias de la voladura en serie y las elevadas intensidades de la voladura en paralelo.

Figura 20. **Conexión mixta de barrenos**



Fuente: elaboración propia.

La resistencia equivalente del circuito se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$R_E = R_L + (R_n / n) = R_L + (N/n^2)(R_D)$$

Donde:

- N : Número de detonadores
- n : Número de series en paralelo
- R_D : Resistencia de cada detonador (Ohmios)
- R_n : Resistencia de cada serie (Ohmios)
- R_L : Resistencia de la línea de tiro (Ohmios)
- R_E : Resistencia equivalente total (Ohmios)

Para que no haya fallos, es necesario que todas las series individuales tengan la misma resistencia, es decir, estén equilibradas, para que de esta forma exista un correcto reparto de la intensidad.

Las recomendaciones sobre flujo de corriente son similares a las utilizadas para circuitos en serie, y los cálculos comprenden los siguientes pasos:

- Encontrar la resistencia de los detonadores de una serie, multiplicando su número por la resistencia por detonador.
- Calcular la resistencia del alambre de conexiones y de la línea de disparo como se hace para un circuito en serie simple.
- Totalizar las resistencias de los detonadores, línea de conexiones y línea de disparo.
- Aplicar la ley de Ohm para determinar la corriente total proporcionada.

- Dividir el total de corriente proporcionada entre el número de series, para obtener la corriente por serie.

La voladura eléctrica, con técnicas sofisticadas como los detonadores de retardo y los secuenciadores electrónicos, ha hecho posible la iniciación segura de gran número de cargas en una secuencia prediseñada desde un lugar seguro y remoto con un control preciso del momento del disparo.

Una voladura eléctrica exitosa depende de cuatro principios generales:

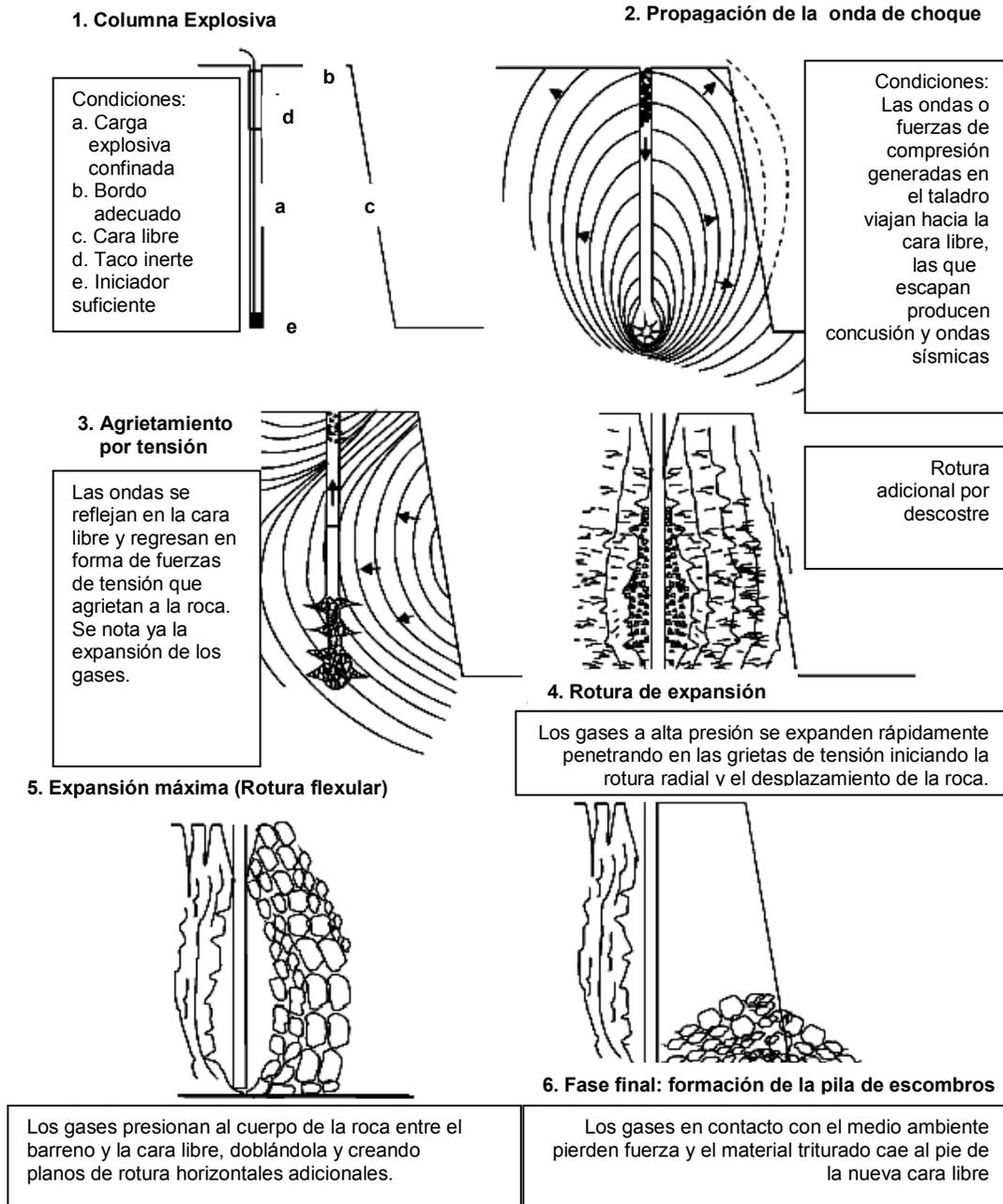
- Una apropiada selección y trazo del circuito de voladura.
- Una fuente de energía adecuada compatible con el tipo de circuito elegido.
- El reconocimiento y eliminación de todos los peligros de naturaleza eléctrica.
- El balance del circuito, conexiones eléctricas bien hechas, y una prueba cuidadosa del mismo.

Es absolutamente necesario tener extremo cuidado en el cableado y prueba del circuito para evitar disparos fallidos.

5.5. Factores de carga según el tipo de roca

Cuando un explosivo detona en un barreno, se produce una onda de tensión en la roca. Las medidas típicas de esta onda se observan en la figura 21.

Figura 21. Fases de ruptura



Fuente: explosivos EXSA S.A. Manual Práctico de Voladura. p. 19.

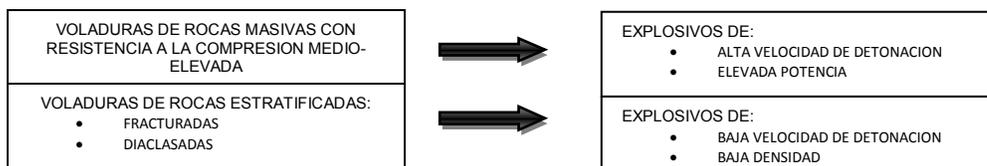
La magnitud y forma de la onda de movimiento rápido en distintos puntos de la roca, depende de muchos factores: el tipo de explosivos, el tipo de roca, la longitud de la columna de explosivos en relación al diámetro del barreno, la distancia desde el barreno, el número de puntos de cebo y la relación de la velocidad de detonación respecto a la velocidad de propagación de la onda de la roca.

La cuidadosa elección del explosivo, de acuerdo con las propiedades geológico-geotécnicas de las rocas, es de clara importancia, si se quiere alcanzar la fragmentación especificada.

En rocas intensamente fracturadas o estratificadas, en las que la superficie total de discontinuidades representa un valor elevado respecto de la superficie específica que se genera con la voladura, los explosivos de mayor eficacia resultan ser los de baja densidad y baja velocidad de detonación.

En rocas de tipo masivo, con resistencia a la compresión de valores medio elevados (> 70 MPa), donde prácticamente toda la superficie específica se crea con la voladura, lo explosivos mas adecuados son lo de mayor potencia y mayor velocidad de detonación (figura 22).

Figura 22. Propiedades de explosivos según el tipo de roca



Fuente: Dirección General de Carreteras, España. Manual para el control y diseño de voladura en obras de carreteras. p. 159.

Como se ha descrito en la secciones de este capítulo el factor de carga (FC) se define como la cantidad de explosivo utilizado por cada metro cúbico o por cada tonelada de roca, expresándose en kilogramos por metro cúbico o kilogramo por tonelada. Este varía dependiendo del tipo de roca, grado de intemperismo, geología del yacimiento, o del tamaño del equipo de carga y acarreo (tabla XVIII).

Tabla XVIII. Factores de carga según el tipo de roca

Roca		Factor de carga Kg/m ³	
Rocas Ígneas	Riolita y dacita	0,530 a 0,715	
	Granodiorita	0,590 a 0,800	
	Andesita	0,530 a 0,715	
	Diorita	0,530 a 0,770	
	Basalto	0,590 a 0,770	
	Gabro, dolerita o diabasa	0,530 a 0,715	
Roca Metamórfica	Roca no foliada	Mármol	0,475 a 0,770
		Hornfeis	0,475 a 0,715
		Taconita	0,475 a 0,770
		Gneiss	0,475 a 0,715
	Roca foliada	Pizarra	0,290 a 0,475
		Esquisto de clorita Micaesquisto	0,350 a 0,600 0,350 a 0,600
Roca Sedimentaria	Conglomerado	0,350 a 0,660	
	Brecha	0,350 a 0,600	
	Arenisca	0,475 a 0,770	
	Caliza	0,230 a 0,475	
	Dolomita	0,290 a 0,475	

Fuente: ASA Organización Industrial S.A. Manual de Usuario ASA. p. 15.

Los factores de carga están expresados en términos generales; por lo que solo proporcionan una idea aproximada a la energía requerida por tipo de roca. Esto es debido a que cada sitio de voladura tiene una geología particular, altura de banco, diámetro de barrenación, etc. Es importante mencionar que el factor de carga también está en función del tamaño de la fragmentación deseada.

5.6. Como elegir el explosivo adecuado

La elección de un determinado explosivo para un esquema de voladuras correspondiente a una obra específica debe hacerse de acuerdo con una serie de parámetros si se quiere alcanzar un resultado satisfactorio.

5.6.1. Naturaleza y propiedades de la roca

El tipo de roca a volar y sus propiedades geomecánicas tienen una incidencia directa en los resultados a conseguir con voladuras. De modo general, puede indicarse que las rocas duras y compactas, necesitan para su voladura el empleo de explosivos de alta potencia y velocidad de detonación, mientras que por el contrario, las rocas blandas, muy fisuradas o porosas, precisan de explosivos de baja densidad y velocidad de detonación, donde los gases que se generen desplacen a la roca.

5.6.2. Diámetro y profundidad de los barrenos

Deben observarse algunas limitaciones de algunos explosivos con determinado diámetro, al no poderse iniciar adecuadamente con el detonador.

Este puede ser el caso, de los explosivos cuya velocidad de detonación varía frecuentemente con el diámetro, como pasa con el Anfo; que utilizado en barrenos con diámetro menor de 40 milímetros, y a una cierta profundidad de los mismos, puede quedar parte de la carga sin detonar.

5.6.3. Humedad en los barrenos

La presencia de agua en el interior de los barrenos, es un factor muy restrictivo en la selección de los tipos de explosivos que queremos utilizar. El caudal que fluye a los barrenos, a si como, la rapidez con que esto se produce, deben a su vez ser condicionantes de las variedades a utilizar.

Los explosivos gelatinosos y las gomas, hidrogeles y emulsiones normales tienen muy buena resistencia al agua. Por el contrario, los explosivos pulverulentos con nitroglicerina tienen un mal comportamiento con este elemento.

5.6.4. Toxicidad de los gases de explosión

La detonación de cualquier tipo de explosivo va a dar lugar a la formación de gases nocivos con ciertos porcentajes de gases nitrosos y óxidos de carbono, dependiendo de la propia composición del explosivo, y del balance de oxígeno. Estas circunstancias desaconsejan el empleo de determinados explosivos, en obras subterráneas, si no existe ventilación o esta es insuficiente en la renovación del aire. Los explosivos que mejores ventajas presentan a este respecto son los hidrogeles y las emulsiones, cuyos gases de voladura son de muy baja toxicidad.

5.6.5. Naturaleza de la atmósfera

En la ejecución de excavaciones mediante voladuras, en obras, con atmósferas de elevado riesgo de explosión por la presencia de partículas de polvo, deben utilizarse explosivos de seguridad. En los casos de duda, será preciso llevar a cabo un estudio determinado del riesgo.

5.6.6. Fragmentación

Los tamaños granulométricos a conseguir en el material volado condicionan la elección del explosivo, así, si se desean tamaños pequeños deberá utilizarse un explosivo rompedor.

5.6.7. Condiciones de seguridad intrínseca

La seguridad intrínseca de los explosivos es un factor a tener en cuenta a la hora de su elección. Depende fundamentalmente de las circunstancias que rodean a las voladuras, antes y después de que estas se produzcan. (Sistemas de carga, maquinaria transitando por el material fragmentado, riplado en zonas próximas, etc.

5.6.8. Factor económico

Debe tenderse a la selección del explosivo buscando la economía del conjunto de la operación: perforación, voladura, carga y transporte del escombro; de forma que el costo del conjunto sea mínimo para una obra determinada, y siempre dentro de unos resultados satisfactorios.

El proteger ahorros excesivos en alguno de los factores que componen la operación suele acarrear el paralelo encarecimiento de los demás y el consiguiente aumento del costo total.

5.7. Rendimiento y avance con explosivos

En principio, debe tenderse a una voladura de dimensiones, lo mayores posibles, por las ventajas que suponen en cuanto a:

- Reducción de problemas de fragmentación que se producen en las zonas.
- La granulometría que se obtiene es mas uniforme.
- Los tiempos de parada de los equipos de carga y transporte se reducen considerablemente.
- Una mayor facilidad para la planificación y control de la operación.
- En el arranque los costos se reducen.

El volumen de roca a excavar, el plazo de tiempo disponible y la organización del trabajo, deben de constituir los tres vértices que determinen los ritmos de trabajo, referidos a la unidad de tiempo elegida; año, mes, semana, día y hora.

5.7.1. Volumen de expansión

Cuando tiene lugar la voladura, la roca se fragmenta aumentando de volumen, esta expansividad tiene especial importancia en el avance, dado que cuando el corte de arranque es pequeño, o dispone de una secuencia de

encendido incorrecta, se produce una deformación plástica del material, que no permite el desplazamiento correcto de roca.

Lo recomendable es adecuar el diseño del corte de arranque para que se produzca al menos un volumen de expansión del 15 por ciento de la zona de macizo rocoso. Este aumento de volumen puede producirse aumentando la carga específica del corte de arranque, si se opta por no realizar barrenos vacíos. Las limitaciones ambientales y la fragmentación a conseguir condicionan su diseño.

5.7.2. Consumo específico de explosivos

Es el parámetro que nos indica la cantidad de explosivos necesaria para producir voladuras de 1 metros cúbicos de roca, a una granulometría dada y en las condiciones de diseño previstos.

Son factores que usualmente inducen al aumento del consumo específico:

- Un aumento del diámetro de los barrenos.
- La resistencia de la roca.
- El grado de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento del material volado.
- Una distribución inadecuada de la carga.
- Tipo de corte de arranque utilizado.
- Una relación longitud/anchura de la voladura no adecuada, etc.

Tabla XIX. **Consumos específicos**

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)	CONSUMO ESPECIFICO (kg/m³)
Rocas Masivas	Resistentes (>120MPa)	0,6 – 1,5
Rocas poco Fracturadas (<4f/m)	Resistencia media (70-120 MPa)	0,3 - 0,6
Rocas muy fracturadas (> 4 f/m)	Resistencia baja (<70MPa)	0,1 – 0,3

Fuente: Dirección General de Carreteras, España. Manual para el control y diseño de voladura en obras de carreteras. p. 160.

5.7.3. Condiciones para el trabajo eficiente de los explosivos

Para poder realizar el trabajo de voladura de forma eficiente se deben cumplir las condiciones necesarias para un resultado satisfactorio.

- La voladura debe contar con cara libre para facilitar la salida de material fragmentado.
- Los barrenos deben estar confinados, para aumentar su densidad de carga (atacado con vara de madera en subsuelo, compactación con aire comprimido a granel y por gravedad en superficie). Sellado del barreno con taco inerte.
- Los barrenos deben ser cuidadosamente cebados.
- Los disparos deben hacerse manteniendo una secuencia ordenada de salidas (temporización).

- El espaciamiento entre barrenos debe ser el adecuado para permitir la interacción de las grietas radiales entre ellos; de lo contrario habrá mala fragmentación, incluso hasta pueden soplarse sin efecto rompedor.

5.8. Problemas posibles en la aplicación de explosivos

La voladura de rocas con explosivos es un sistema económico de arranque, que requiere de la aplicación adecuada de técnicas de perforación, utilización de los explosivos y accesorios, que presenta retos lógicos en su aplicación, derivados de:

- La naturaleza propia del explosivo, que actúa poniendo en actividad una cantidad de energía, en un tiempo corto, con una influencia notable sobre el entorno.
- El medio sobre el que actúa, heterogéneo y variable de un punto a otro del mismo frente o zona de trabajo del cual puede tenerse un conocimiento limitado.

Las voladuras constituyen, pues, siempre una operación delicada, planteando problemas que son precisos conocer y dominar.

5.8.1. Fallos en el disparo

Se puede distinguir el fallo en: la iniciación de la voladura completa, la iniciación de un barreno, o de una serie de barrenos, la porción de uno o varios barrenos. Hay pues, un problema de costo y sobre todo de seguridad.

Los problemas a los que da lugar son:

- Recuperación del explosivo no activado después de la voladura.
- Roca mal fragmentada (perfiles irregulares).
- Explosivo acompañando a la roca arrancada.
- Necesidad de perforación y de voladuras suplementarias, con riesgos derivados de: perforar junto a barrenos con explosivo y de proyecciones de roca.

5.8.2. Proyecciones

En toda voladura se produce una proyección del material extraído, pudiendo llegar a preverse la forma y situación del volumen volado, evitando que rocas en vuelo perforen techos o causen cualquier tipo de pérdida humana o material.

Existe sin embargo, el riesgo de proyecciones de roca a distancias considerables, que pueden ser debidas a:

- Una sobrecarga local, por causas diversas: un mal diseño de la voladura, desviaciones en la perforación, etc.
- Presencia de grietas, cuevas, diaclasas, etc.
- Terreno suelto, por su propia naturaleza o por el efecto de voladuras anteriores.

- Intercalaciones de capas de distinta resistencia.

5.8.3. Vibraciones

Dependen fundamentalmente de: la carga instantánea, los tiempos de retardo empleados, la distancia al punto de la voladura y de la naturaleza de los terrenos atravesados por la vibración.

Dan lugar a problemas en el Medio Ambiente, con repercusiones en el aspecto económico.

5.8.4. Ruidos

La onda aérea rara vez da lugar a daños, a pesar de lo cual su influencia en el Medio Natural es muy importante, constituyendo en muchos casos, el mayor motivo de reclamaciones.

Hay que distinguir siempre entre los ruidos normales de una voladura, y los originados por:

- Los iniciadores de la voladura, los detonadores y el cordón detonante, situados en la superficie del terreno.
- La explosión dentro del barreno.
- La caída del material volado.

- Los ruidos accidentales, con el mismo origen que las proyecciones, y a las que acompañan.

Una buena práctica es cubrir los detonadores y el cordón detonante con una capa de tierra de 20 a 30 centímetros de altura.

5.8.5. Repiés

Son porciones de roca sin volar en la parte inferior del banco. Su origen puede ser muy variado: insuficiente cantidad de explosivo, inclinación desfavorable de los estratos (en relación con la orientación del frente), capas mas blandas próximas a la parte interior del banco y presencia de agua en el barreno.

Una buena parte de los repiés pueden ser evitados con un diseño adecuado de los frentes, en función de las características del terreno a volar.

5.8.6. Encendidos intempestivos

El riesgo es muy elevado con el encendido por mecha. Actualmente, con los detonadores eléctricos, queda reducido al que puede producirse por corrientes eléctricas.

El cumplimiento de las reglas de encendido, la conexión de los detonadores eléctricos inmediatamente antes de la voladura, y el empleo de detonadores insensibles o, si fuere necesario, altamente insensibles, permite la desaparición de este riesgo en la mayor parte de los casos.

6. VIBRACIONES GENERADAS POR LA DETONACIÓN DEL EXPLOSIVO

6.1. Características

Al producirse la detonación del explosivo se produce en el entorno de la carga una onda de compresión, debida a la liberación de gases y aumento de la temperatura. La pendiente inicial de esta onda de compresión depende solo del gradiente de la liberación de gases, esto es, la velocidad de detonación del explosivo.

Al aumentar su valor, esta onda de compresión produce una pulverización del material en el entorno de la carga y la apertura de grietas radiales, amortiguando la energía y disminuyendo la pendiente de la onda de presión. Al transmitirse la onda por el medio llega a la superficie libre, donde se refleja pasando a una onda de sentido de avance inverso al de la onda incidente.

Como la resistencia a tracción del medio es muy inferior a la de compresión, la onda de tracción produce la rotura de la roca, disipando la mayor parte de la energía acumulada.

Así pues, la rotura del terreno se produce por las siguientes causas:

- Pulverización por efecto de la onda de compresión.
- Agrietamiento radial por tracciones, debido a la onda de compresión.

- Rotura en frente o en cráter por las tracciones inducidas por la onda reflejada.
- Roturas a cortante por efecto de las ondas de compresión y de tracción.

Las vibraciones generadas por las voladuras se consideran entonces como ondas de tipo sinusoidal, donde los parámetros básicos de análisis son:

- Amplitud: es el desplazamiento máximo de un punto del terreno desde su posición de reposo, en milímetros o pulgadas.
- Velocidad de partícula (VPP): es la velocidad a la que se desplaza el punto, en milímetros por segundo o pulgadas por segundo.
- Aceleración: es el ritmo de cambio de la velocidad, en metros por segundo al cuadrado o pies por segundo al cuadrado.
- Frecuencia: es el número completo de oscilaciones en ciclos por segundo.

En voladuras, la amplitud es definida usualmente en términos de velocidad y la frecuencia en Hertz, o ciclos por segundo.

6.2. Clasificación

Cada rotura o grieta implica una acumulación de energía elástica primero, y posteriormente su disipación dinámica en el trabajo de rotura y, por tanto, en la generación de ondas que comúnmente son registradas de manera instrumental.

6.2.1. Ondas de cuerpo

Las cuales se desplazan a través del “cuerpo” del material, como también por la superficie, se propagan en toda dirección y provocan:

- Ondas longitudinales, llamadas también ondas de dilatación, compresión, primarias u ondas P, son las que viajan mas velozmente. Las partículas se desplazan en dirección radial con respecto a la fuente, es decir, en la dirección de la propagación.
- Ondas transversales, también llamadas ondas de distorsión, de corte, de cuerpo u ondas S o secundarias, estas viajan lentamente en comparación con las ondas longitudinales.

6.2.2. Ondas de superficie

Son las que transmiten mayor cantidad de energía, dentro de las cuales de puede mencionar:

- Ondas *Raleigh*, también llamadas ondas R, su movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en la dirección de la trayectoria de las ondas con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente.
- Ondas *Love*: también llamadas ondas L, tienen un movimiento similar al de las ondas S, haciendo vibrar las partículas horizontalmente, en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical.

6.3. Controles de vibración y equipo

Un equipo de control de vibraciones se compone básicamente de:

- Unos captadores electrodinámicos o piezoeléctricos (geófonos).
- Un equipo que amplifica las señales que vienen de los captadores, generalmente acoplado a un sistema de registro que permiten visualizar y tratar los datos para su interpretación, denominados sismógrafos para voladuras.

Los equipos de registro mas simples solo graban el dibujo de la onda en un papel, sirviendo para verificar esporádicamente si el valor pico de la vibración sobrepasa un determinado nivel.

Los equipos mas completos para la realización de estudios llevan incorporados sistemas de grabación analógicos o digitales para el análisis de los valores recibidos en el campo, proporcionando mayor información (frecuencia, nivel de energía, etc.).

Existen por lo tanto diversas opciones para la medición de vibraciones directamente en el terreno. Los que registran solo la velocidad pico son baratos, fáciles de usar y adecuados en muchos casos para asegurar el cumplimiento de normas y regulaciones. Sin embargo, los sismógrafos que registran el evento total son más útiles para el mejor entendimiento e investigación de los problemas de vibración.

6.4. Daños geotécnicos provocados por vibraciones

Cuando el área alrededor del lugar de voladura es rocosa y la cubierta del suelo es poco profunda, las vibraciones se caracterizan por tener frecuencias relativamente mas altas y desplazamientos mas cortos; pero, si el área alrededor del lugar de voladura tiene una capa profunda de suelo (como las que se encuentran en los valles aluviales), las vibraciones se caracterizan por tener frecuencias relativamente mas bajas y desplazamientos mas largos.

Las voladuras producen daños en el macizo rocoso circundante a la roca arrancada. Los mecanismos de estos son principalmente dos:

- Los causados por la vibración de alta velocidad y/o baja frecuencia, con la consiguiente aparición de grietas o apertura de las juntas existentes.
- Los causados por la acción de los gases de voladura, un empuje en todas direcciones pudiendo llegar a afectar seriamente la integridad del macizo rocoso.

La caracterización de la geología con la que vamos a tratar a la hora de diseñar voladuras es la primera etapa en el diseño. Tanto los macizos con escasa resistencia (roca blanda y plástica, juntas meteorizadas, presencia de cuevas de arcilla de gran tamaño) o resistencias muy altas (roca dura, juntas muy marcadas y cerradas) presentan los mayores retos en el diseño de voladuras.

Una roca dura y con juntas cerradas y consistentes precisará de explosivo, más potente, con elevada energía de tensión y con menos probabilidad de error en su distribución a lo largo del talud. Los macizos blandos o poco consistentes

requerirán por el contrario una buena definición del alcance de daños de la voladura para que el saneo por parte de la maquinaria sea uniforme y eficiente.

Debe tenerse también en cuenta que ciertas estructuras rocosas (o zonas de éstas) no son estables una vez retirado el soporte rocoso que se excava, independientemente de un mejor o peor diseño de voladura.

6.5. Evaluación post detonación

Después del disparo y solamente después de haber pasado un tiempo prudencial de 30 minutos, el encargado de la operación (experto en explosivos) regresara al lugar de la voladura para efectuar su evaluación de la fragmentación, empuje, volumen removido y sobre rotura. Es en este momento que deberá tener presentes los riesgos de gases tóxicos remanentes, restos de explosivo o accesorios no denotados (tiros fallados) y el desprendimiento de bloques de roca capaces de causar daño. En estos casos se prohibirá el acceso al lugar hasta no haber conjugado el peligro.

7. PLANIFICACIÓN REGLÓN EXTRACCIÓN ROCA CON EXPLOSIVOS

7.1. Inspección ocular del proyecto

Antes del comienzo de una excavación en roca, mediante voladuras, es de gran importancia planificar los trabajos, para poder coordinar las diferentes etapas del proyecto.

Aspectos y conocimientos de la obra como: las condiciones topográficas, presencia de acuíferos e hídrica, áreas arqueológica, características ambientales de flora y fauna, zonas de cultivo, zonas pobladas, características del entorno geológico, el tiempo de ejecución, los costes operativos, etc., deben ser factores de criterio para desarrollar una planificación efectiva.

La inspección ocular de los sitios de voladura brinda información relacionada a factores generales y operativos que afectan el conjunto del proyecto o que intervienen en las distintas etapas de ejecución.

Entre los factores generales deben señalarse por su importancia:

- La situación geográfica.
- El volumen de roca a volar.
- Los tipos de roca y sus propiedades físicas como dureza y tenacidad.

- La geometría de la excavación.
- Las alteraciones ambientales y sus umbrales aceptables.
- Los accesos y servicios disponibles en la obra.
- La fragmentación de la roca a conseguir.
- El costo global de la perforación y voladuras.

Entre los factores operativos se pueden mencionar:

- El esquema de ejecución de la excavación.
- La longitud o profundidades de los frentes de operación.
- El número de voladuras parciales.
- Los distintos accesos a los frentes de trabajo.

El análisis cuidadoso de todos los factores observados, tanto generales como operativos, permite definir un plan de trabajo adecuado que cumpla con los objetivos y cubra las necesidades de la obra.

7.2. Estudio tipográfico de los sitios diferentes de voladura

El primer paso para construir una carreta, consiste en preparar planos y especificaciones para cada fase de trabajo, describiendo en detalle que materiales se irán a usar y cual será el trabajo por hacer.

Las hojas de planta y perfil, están divididas horizontalmente, colocando la planta en la parte superior y el perfil debajo, en estas hojas pueden ser ubicadas las estaciones en donde será necesario el uso de explosivos, dadas

las propiedades físicas de los estratos rocosos, que restringen el uso de maquinaria típica para excavación en carreteras.

Las secciones transversales típicas, muestran el ancho de la explanación, así como la forma general de tratar taludes en corte. También muestra la manera de poner peraltes y sobreeanchos a las curvas y el tratamiento requerido para diversas condiciones naturales; tales como los cortes en roca.

Las secciones transversales detalladas, muestran las secciones de las estaciones ubicadas cada 20 metros. En los tramos del proyecto en donde se encuentre roca sólida, se deben realizar suficientes perforaciones y sondeos de modo que pueda determinarse la sección transversal de la superficie rocosa.

Generalmente, contando con tres perforaciones por sección, se podrá mostrar el talud del lecho rocoso con suficiente exactitud; una en el eje, otra a la izquierda de la línea de cunetas y la tercera, a la derecha de ella. Si la profundidad del terreno de recubrimiento fuera bastante uniforme, no será necesario hacer las perforaciones laterales en cada estación.

Si la roca sólida aflorara a la superficie, debe anotarse y señalarse, describiendo la clase de roca, dureza, profundidad y dirección de cada afloración.

7.3. Sub contratación de voladuras

Las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, extendida por la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala, define al Contratista

como la persona individual o jurídica con quien el estado ha celebrado contrato para la ejecución de una obra ó servicio.

Si la empresa contratista que ejecuta obras para la apertura y/o ampliación de carreteras, no cuenta con los permisos, licencias y personal autorizado por el Ministerio de la Defensa Nacional, para llevar acabo trabajos con explosivos comerciales, tendrá la necesidad de realizar sub-contrataciones.

La sub-contratación por parte de la empresa dueña del proyecto o contratista, se realiza dadas las características especializadas, propias del trabajo de voladura, así como de la necesidad de permisos y licencias requeridas para la utilización de explosivos comerciales y servicios de expertos en voladura de rocas.

Entre el contratista y la empresa sub-contratada para las voladuras de roca, debe existir un instrumento jurídico o contrato en donde se norman los derechos y obligaciones de ambas partes, para la ejecución de los trabajos.

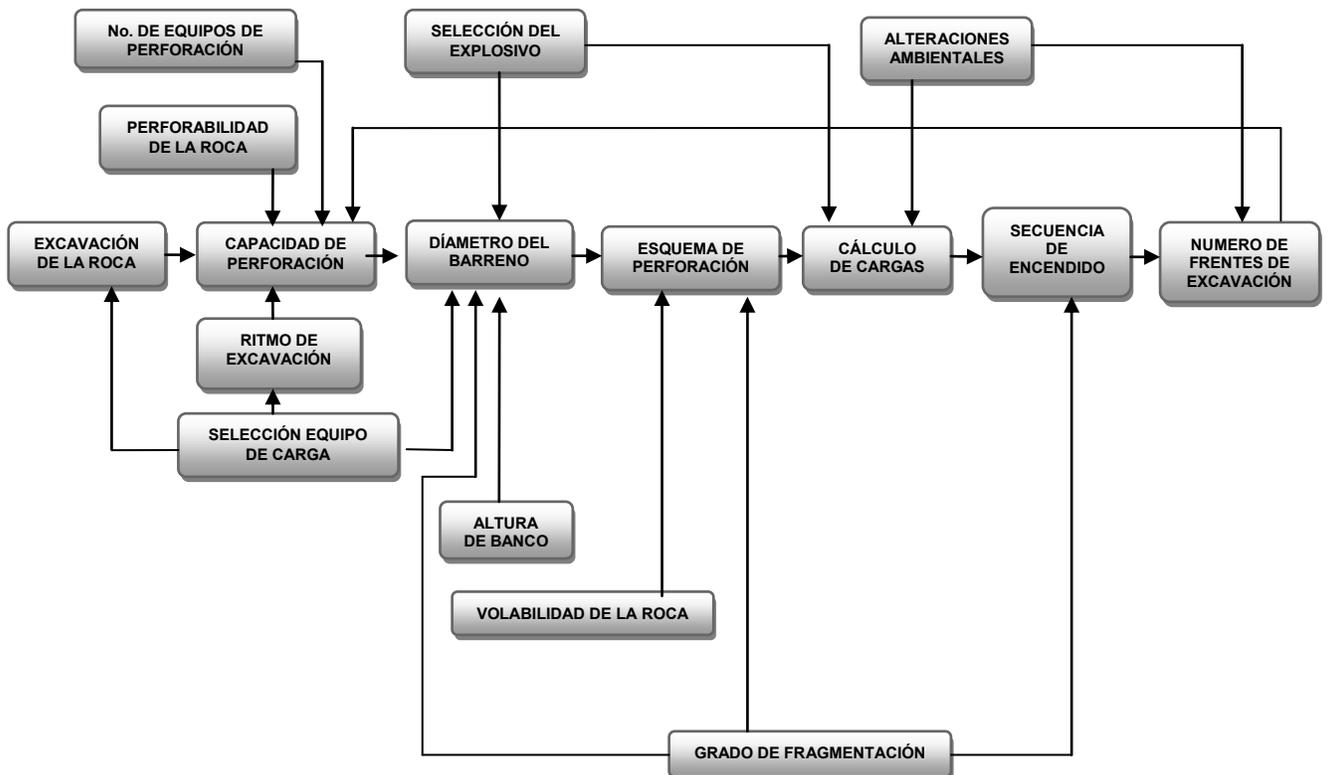
Es esencial que los documentos del contrato describan la superficie de contacto entre el suelo y la roca tan precisamente como sea posible y que se fijen claramente los límites de pago para cada clase de material. En algunos casos esto es difícil y el contrato de excavación se hace globalmente, es decir, considerando una sola categoría de material, sin clasificar, que incluye cualquier cosa, desde basura a roca.

Aunque utilizar una sola categoría de material, sin clasificar, evita cualquier controversia, el costo del trabajo se eleva, pues el contratista debe incluir un alto imprevisto debido a la incertidumbre con respecto a las cantidades de excavación en suelo y la excavación en roca.

7.4. Programa para la ejecución de voladuras del proyecto

El análisis cuidadoso de factores generales y operativos debe permitir definir un diseño del esquema de la voladura, con determinación de su geometría, el equipo de perforación, los diámetros de los barrenos, los tipos de explosivos a utilizar y sus accesorios, los tiempos de retardo, la secuencia de encendido y las medidas de protección y seguridad (figura 24).

Figura 23. Ciclo del esquema básico de planificación



Fuente: elaboración propia.

7.4.1. Programa de tiro

Generado en función de las necesidades del proyecto: volumen de roca a mover, condiciones geológicas particulares de cada sitio de voladura y tiempos requeridos para el movimiento de tierras, así como los costos respectivos a las actividades de voladura.

7.4.1.1. Elección del explosivo

Este se selecciona dadas las características geomecánicas del macizo rocoso sobre el cual actuara, estructuras geológicas presentes en el área de voladura y el entorno general del los sitios en donde será utilizado el explosivo, como medios para el aflojamiento y fragmentación de la roca.

Como parámetros que deben considerarse están:

- El costo de la perforación y voladura
- El diámetro de la carga
- Las características geomecánicas de las rocas a volar
- La aparición o no de agua en los barrenos
- Las condiciones de seguridad
- Los umbrales críticos ambientales

Desde una perspectiva económica, el mejor explosivo no tiene por que ser el más caro, sino aquel con el que se consiga el menor costo para la fragmentación deseada, en condiciones de trabajo normales.

7.4.1.2. Accesorios de los explosivos

Los accesorios de voladura están ligados a los tipos de explosivos elegidos, a las secuencias de encendido, a los tiempos de retardo, al grado de fragmentación requerido a las limitaciones ambientales y a las condiciones de seguridad.

7.4.1.3. Esquema geométrico

El esquema geométrico depende directamente de las características de planimetría y altimétrica de cada sitio de voladura, tomando en cuenta la dirección en la cual puede ser desplazado el material rocoso.

Los factores que influyen en la determinación del esquema son:

- La geometría de la excavación a realizar, con definición en planta
- La altura del banco
- El diámetro de perforación
- Las propiedades geomecánicas de la roca
- El tipo de explosivo
- Las limitaciones ambientales
- El costo de perforación y voladura

Y las variables que definen el esquema geométrico son:

- La piedra
- El espaciamiento

- La longitud de perforación
- El retacado y
- La inclinación de los barrenos

7.4.1.4. Secuencia de encendido

Las secuencias de encendido deberán establecerse en función de los planos libres de rotura, de la dirección de proyección, y de los resultados de fragmentación que se deseen. Son objetivos a conseguir:

- La reducción de las cargas instantáneas, y por lo tanto, el nivel de vibraciones en el entorno de la obra.
- La eliminación del riesgo de accidentes, adoptando las protecciones oportunas.

7.4.1.5. Tamaño de la voladura

En principio, debe tenderse a una voladura de dimensiones, lo mayor posible, por las ventajas que supone en cuanto a:

- Reducción de los problemas de fragmentación que se producen en la zona.
- La granulometría que se obtiene es mas uniforme.
- Los tiempos de parada de los equipos de carga y transporte se reducen considerablemente.

- Una mayor facilidad para la planificación y control de la operación.
- En el arranque los costes se reducen.

7.4.2. Programa de medidas de seguridad pre y post tiro

Los sistemas de protección y medidas de seguridad, se deben fijar en función de las limitaciones que plantea el medio natural donde se vayan a realizar las voladuras.

La dirección del avance debe de elegirse con el criterio de minimizar los presuntos problemas y riesgos que se puedan originar, sobre todo en las cercanías de las poblaciones.

Las rocas volantes son un riesgo latente y la mejor protección es una distancia segura y cobertura adecuada. Todo el personal involucrado debe ser instruido al respecto y saber hacia donde dirigirse para protección.

Es muy importante evitar tiros prematuros, pues estos no avisan ni dan tiempo a escapar, no correr riesgos innecesarios ni permitir que otros los corran por ignorancia o desconocimiento del disparo, son razones por las cuales es requerido un eficiente sistema de vigilancia para alertar a las personas ajena y evitar que se acerquen al área de voladura en el momento del disparo.

7.5. Memoria de la voladura

La memoria de la voladura es en esencia el registro de las características del diseño de la voladura y debe incluir lo siguiente:

- Todas las dimensiones de cada voladura incluyendo las profundidades de los agujeros para la detonación, el volumen de roca por cada voladura, espaciamiento, sub-perforación, revestimiento, cargas explosivos y tiempos.
- Un plano o esquema mostrando la dirección de la superficie o superficies y el trazo físico de la voladura.

7.6. Medida y pago

La medida del volumen en metros cúbicos de roca, con aproximación de dos decimales, medidos en su posición original *in situ*, puede calcularse por medio del método promedio de áreas extremas para secciones transversales, por camionada u otro método según el acuerdo entre el Contratista y la empresa experta en voladuras sub-contratada, siempre y cuando sea aprobado por el Delegado Residente asignado al proyecto.

Las mediciones topográficas las efectuara el contratista bajo la supervisión continua del Delegado Residente, el cual aprobará los registros del levantamiento.

Las secciones transversales deberán obtenerse normales a la línea central y su espaciamiento no debe exceder de 20 metros. Cuando haya cambios muy notorios en la conformación del terreno, se toman secciones transversales donde el terreno lo requiera.

Las secciones transversales se deben tomar en un ancho hasta la intersección del pie o la corona del talud proyectado con el terreno natural. Todas las distancias entre las secciones transversales deberán ser

proyecciones horizontales a partir de la línea central. Para cada sección se levantarán puntos de control en cada punto de ruptura pero no menos de 5 metros entre ellos.

El pago del trabajo de voladura se determina en función del precio unitario asignado al metro cúbico de material rocoso excavado para el contrato correspondiente.

En los renglones de contrato basados en precio unitario, se paga al contratista la cantidad de trabajo realmente ejecutada de acuerdo con los planos, especificaciones, contrato y demás documentos que forman parte del mismo, con base en las medidas hechas conjuntamente, entre el Delegado Residente y el Contratista.

En el volumen que servirá para base de pago, no deben de incluirse volúmenes adicionales causados por desprendimientos, derrumbes, hundimientos, sedimentaciones o rellenos debidos a causa naturales o a descuidos del contratista.

Para el desarrollo adecuado de los trabajos de voladura es de suma importancia tanto para la empresa contratista como para la empresa sub-contratada, conocer y respetar los lineamientos para el renglón extracción roca con explosivos, enmarcados en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, publicada por la Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicación, Infraestructura y Vivienda de Guatemala, así como de las especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales SIECA.

8. INTEGRACIÓN DEL PRECIO DE VOLADURA

8.1. Generalidades

El presupuesto para realizar una voladura de roca con el uso de explosivos, es la estimación de los diferentes costos antes de que sea realizado el trabajo. El presupuesto se forma a través del análisis económico del proyecto en función de condiciones propias del trabajo a desarrollar.

El costo de la voladura es directamente proporcional a la relación entre el volumen que es requerido aflojar o romper y el tiempo en que este trabajo debe ser realizado, es por esto que el programa de ejecución de voladura juega un rol esencial para desarrollar el proyecto de forma eficiente.

El Contratista debe elaborar y suministrar al Delegado Residente un programa general para la ejecución de voladuras. En el mismo deben de incluirse detalles completos de ejecución, localización y ubicación de kilómetros y estacionamientos propuestos para las voladuras; así el Delegado Residente y el Contratista, dan seguimientos y monitoreo a cada voladura, dejando registro de todos los eventos.

El programa general de voladuras deberá ser aprobado por el Ingeniero Supervisor y conocido por el Departamento de Gestión Ambiental de la División de Planificación y Estudios de la Dirección General de Caminos.

Una gerencia de voladura debe manejar programas parciales que detallen:

- Dimensiones máximas para el ancho, la longitud y la profundidad de las voladuras.
- Plano típico y vista en sección de la plantilla de barrenación para los agujeros. Debe indicar la cara libre, capacidad, diámetros de los agujeros, espaciamientos, inclinaciones y profundidad de la sub-perforación.
- Diagrama del patrón de carga que muestre:
 - Localización de cada agujero.
 - Localización y cantidad de cada tipo de explosivo en cada agujero incluyendo el cebo y los iniciadores.
 - Localización, tipo y profundidad del taco.
- Iniciación y métodos de retraso, tiempos de retraso y factor total de explosivos.
- Hojas de datos del fabricante para todos los explosivos, cebos, iniciadores y otros dispositivos.
- Procedimientos de trabajo y precauciones de seguridad para el almacenaje, transporte y manejo de los explosivos.
- Procedimientos de trabajo y precauciones de seguridad para la voladura.

- Plan de seguridad y contingencia para el manejo, operación y dirección de las actividades para la voladura, dirigido a los operarios y a los usuarios de explosivos y accesorios

8.2. Guía de renglones de trabajo

Para poder determinar el valor al trabajo de voladura de roca en un proyecto de carretera, es necesario considerar las diferentes actividades que deberán ser realizadas. Cada actividad representa un costo que debe ser integrado para determinar el precio final.

8.2.1. Estimación del volumen de la voladura

Tras la inspección ocular y el análisis topográfico realizado a los planos y secciones transversales, se ubican las estaciones donde será necesaria la utilización de explosivos, dada la presencia de estratos rocosos. La medida del volumen teórico se estima usando el método de áreas extremas, u otro método convenido con el Supervisor y comunicado al experto.

Al realizase la voladura de acuerdo al sitio programado, deben de realizarse las mediciones de campo que permitan realizar una comparación entre el volumen teórico y el volumen práctico real obtenido. Además una inspección ocular a los sitios de voladura se realiza, con el objetivo de obtener la mayor información de campo posible, que luego servirá para afinar criterios y determinar la metodología a seguir para el mejor diseño de voladura.

Una vez determinado el volumen de roca total que es necesario mover para la realización del proyecto, el contratista iniciara negociaciones con empresas o expertos para los trabajos de voladura, indicando sus

requerimientos en tiempo y volúmenes de roca; el contratista coordinara la producción y limpieza de áreas voladas, para el cumplimiento de sus plazos contractuales.

8.2.2. Diseño de voladura

El diseño de la voladura es realizado por la empresa sub-contratada, sin embargo, el contratista es el dueño del proyecto, por lo tanto es responsable del trabajo realizado, debe chequear el diseño, conocer el tema para sugerir los cambios que efficienten la voladura y mejoren la fracturación y extracción de la roca.

El Delegado Residente y el Superintendente a cargo del proyecto respectivamente, deben tener los conocimientos necesarios y suficientes para el análisis de parámetros, tales como: perforación, geométricos, de carga y de tiempo, que pueden ser controlables; además de parámetros variables como: la física de la roca, necesidades reales del trabajo y condiciones del terreno; de esta manera podrán verificar si el diseño presentado por el sub-contratista cumple con las necesidades requeridas de volumen y tiempo, para desarrollo eficiente de la voladura.

8.2.3. Perforación de barrenos

Para conseguir una voladura eficiente la perforación es tan importante como la selección del explosivo, por lo que este trabajo debe ejecutarse con buen criterio y cuidado, considerando todas las variables incluyendo el transporte y almacenamiento de explosivo y accesorios.

La supervisión en los trabajos de barrenación es importante pues si este es deficiente también lo será la voladura; deben de evitarse los taladros desviados; la separación entre barrenos debe ser la establecida, la irregularidad en su longitud, etc., pues determinan pérdidas de eficiencia de la energía explosiva disponible.

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

- El diámetro depende del tipo de aplicación en que el barreno será utilizado. Como regla general, el de “menor diámetro factible” será el mas adecuado y económico de realizar.
- La longitud (profundidad del barreno) influye mucho en la elección de la capacidad del equipo perforador y naturalmente en el avance de las voladuras.
- La rectitud varía con el tipo de roca, método de perforación y características del equipo perforador. Deben tener la mayor rectitud y alineamiento para que el explosivo sea apropiadamente distribuido.
- La estabilidad es importante dado que los barrenos deben mantenerse abiertos hasta el momento de su empleo. En terrenos sueltos tienden a desmoronarse por lo que puede ser necesario revestirlos interiormente con tubos especiales para poderlos cargar o hacer otro barreno adyacente al obturado.

Existen casos en los que algunos trabajos de voladura requieren taladros de gran longitud, paralelos o distribuidos en forma radial. Los paralelos emplean máquinas perforadoras especiales en marcas tales como: Simba (perforadora en cabeza de alta velocidad), Pack-sac (máquina perforadora neumática con doble anclaje), diamondrill (de perforación profunda) y otras.

Es fundamental que los operadores perforistas conozcan a fondo el manejo de su máquina, sus posibilidades y limitaciones, su mantenimiento básico y capten claramente los diseños del trazo o plantilla de perforación, entendiendo claramente el propósito o finalidad de la voladura a realizar.

8.2.4. Ejecución de la voladura

La ejecución de la voladura esta a cargo del experto en explosivos asignado por la empresa sub-contratista, conlleva los trabajos de inspección de agujeros, cebado, carga de explosivos, taqueado del barreno, conexión de circuitos y retardos, así como la detonación final.

Es importante que la empresa contratista revise la documentación presentada por la empresa sub-contratada, en donde debe constar que el experto en explosivos asignado al proyecto posee licencia vigente y cumpla con todos los requisitos que la ley requiere para la realización de este tipo de trabajos.

El experto en explosivos se apoya frecuentemente para ejecución de la voladura, en un barrenero y un ayudante, tomando en cuenta que la cantidad de personal variara en función del número de agujeros, cantidad de explosivo a cargar y el tiempo requerido para la ejecución de la voladura.

La ejecución de la voladura implica variables importantes tales como el almacenaje y transporte de los explosivos que debe realizarse conforme lo establece el Reglamento para la importación, almacenaje, transporte y uso de explosivos extendido por el Ministerio de la Defensa Nacional.

8.2.5. Limpieza del área volada

Aunque el movimiento de tierras en la apertura y ampliación de carreteras con el uso de maquinaria pesada no es parte de la presente tesis, debe mencionarse que es una variable de gran importancia para la culminación exitosa del programa de voladuras, dado que el acarreo del material volado al botadero mas cercano u otro sitio, implica tiempo y recursos que deberán ser coordinados en función de la producción de escombros.

8.3. Secuencia de actividades de campo

Estas actividades se llevan acabo en el sitio donde se realiza una voladura, incluyendo todos aquellos trabajos, que tienen como objetivo, el desarrollo exitoso de la perforación de barrenos, carga del explosivo y detonación del mismo.

8.3.1. Perforación

El precio de un equipo de perforación puede variar considerablemente dependiendo de la gama de diámetros de barreno, del grado de mecanización, de la capacidad del compresor y de la experiencia laboral de los operarios.

Las unidades de perforación con martillo en fondo totalmente autónomas, con compresor incluido, son más caras. No obstante, si distribuimos los costos

de inversión por milímetro de diámetro de barreno, la diferencia sería marginal, o incluso ventajosa para las citadas unidades.

El costo de perforación por metro perforado puede calcularse con la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{C_a + C_i + C_m + C_o + C_e + C_l}{V_m} + C_b$$

Donde:

- C_t : Costo de perforación [Qtz/m]
- C_a : Amortización [Qtz/hrs]
- C_i : Intereses y seguros [Qtz/hrs]
- C_m : Mantenimiento [Qtz/hrs]
- C_o : Mano de obra [Qtz/hrs]
- C_e : energía [Qtz/hrs]
- C_l : Engrase y lubricación [Qtz/hrs]
- C_b : Broca, estabilizador y barra [Qtz/m]
- V_m : Velocidad de perforación media [m/hrs]

8.3.1.1. Amortización

La vida operativa de las perforadoras se puede estimar en 30 000 horas ó 7 años para las perforadoras eléctricas y de 20 000 horas o 5 años para las unidades diesel-hidráulicas sobre camión. Para calcular el costo de

amortización se divide el precio de adquisición menos el valor residual por el número de horas previsto.

$$C_t = \frac{\text{Precio de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{Horas de vida}}$$

8.3.1.2. Intereses, seguros e impuestos

La mayor parte de la maquinaria se compra con dinero prestado y por tanto deben tenerse en cuenta los intereses, además de los costos de seguros e impuestos que el equipo origina.

Para calcularlos se puede emplear la fórmula:

$$C_i = \frac{\frac{n+1}{2n} \times \text{Precio adquisición} \times \% (\text{interés} + \text{seguros} + \text{impuestos})}{\text{Horas de trabajo al año}}$$

n = número de años de vida.

8.3.1.3. Mantenimiento

Representa los costos de reparación de averías y el mantenimiento preventivo. Se puede estimar multiplicando el precio de la máquina por 5×10^{-5} en perforadoras eléctricas o por 6×10^{-5} en las unidades diesel.

8.3.1.4. Mano de obra

Corresponde al costo horario del perforista, incluyendo prestaciones laborales, bonificaciones legales y también el del ayudante en los casos en que se precise.

8.3.1.5. Energía

Este costo puede ser de energía eléctrica o diesel, y se calcula a partir de las especificaciones de los motores.

8.3.1.6. Aceites y grasas

Se determina a partir de los datos suministrados por el fabricante, referidos a cambios de aceite, sistemas hidráulicos y capacidades de los depósitos. Suele estimarse entre un 15 y un 20 por ciento del costo de energía.

8.3.1.7. Velocidad media

Existen dos procedimientos para la determinación de la velocidad de penetración, la cual es necesaria por la influencia en el resto de las operaciones.

- Mediante la realización de ensayos a escala por las casa fabricantes, sobre muestras representativas, donde se estima la velocidad de penetración.
- Por calculo de este parámetro a partir de la resistencia a compresión simple de la roca.

La velocidad media se estima por la expresión:

$$V_m = 2 \times V_p^{0,65}$$

Donde:

V_m : velocidad media de perforación (m/hrs)

V_p : velocidad de penetración (m/hrs)

Se incluyen los tiempos muertos y la disponibilidad de los equipos, supuesta del 80 por ciento.

8.3.1.8. Broca, estabilizador y barra

Constituye una de las partidas críticas, debido por un lado a la falta de información previa de los técnicos y por otro a su importancia, ya que su peso sobre el costo del metro perforado oscila entre el 15 y el 40 por ciento del costo total, según la dureza de la roca.

La duración, por ejemplo, de un tricono puede estimarse a partir de la ecuación:

$$\text{Vida (m)} = \frac{28,140 \times D^{1,55} \times E^{1,67}}{Nr} \times 3 \times V_p$$

Donde:

Vida (m): metros perforados

- D : Diámetro (pulgadas)
- E : Empuje sobre la roca (miles de libras)
- Nr: Velocidad de rotación (r.p.m)
- Vp: Velocidad de penetración

Las barras y estabilizadores suelen tener una vida media de 11 000 a 30 000 metros, respectivamente; sin embargo debe solicitarse al fabricante las características de cada accesorio de perforación a ser utilizado.

8.3.2. Voladura primaria

Se conoce con este nombre a la operación de trocear la roca sin producir su desplazamiento y volteo, con el objetivo de arrancarla seguidamente con medios mecánicos: tractores, bulldozer, palas-cargadoras, excavadoras, etc.

Su campo de aplicación en obras viales, suele ser en áreas donde las voladuras pueden presentar riegos, respecto a niveles de vibraciones no admisibles, onda aérea y proyecciones especialmente. Tal es el caso en ampliaciones o aperturas de carreteras cercanas a poblados o donde el desplazamiento de la roca pudiera bloquear el tránsito vehicular.

Requieren de unas características geológicas dadas, como son: una roca lo mas homogénea posible, una estratificación que en el caso de su existencia, tenga una disposición que se aproxime a la horizontalidad, juntas y fracturas poco densa. El tipo de roca debe clasificarse como blando-semiduro, con valores de las resistencias a la compresión simple en el entorno de los 80 mega Pascales (80×10^6 kilogramo sobre metro por segundo al cuadrado).

Independientemente del medio mecánico que se vaya a utilizar para remover la roca fragmentada, como parámetros de orientación de las variables básicas, pueden adoptarse las siguientes:

- El diámetro de perforación suele estar comprendido entre 2 ½" (63,4 milímetros) y 3 ½" (88,9 milímetros).
- Existe la tendencia a elegir equipos de perforación de martillo en cabeza.
- El esquema de perforación suele ser cuadrado, por lo que el espaciamiento es igual al bordo y separación.
- La sobreperforación se estima del orden de 0,03 a 0,05 veces la separación.
- El consumo específico suele estar comprendido entre 80 y 250 gramos por metros cúbicos dependiendo de las características de los equipos de arranque, y de las características geomecánicas de la roca.
- La potencia del nivel de roca para la que suele diseñarse una voladura primaria esta entre 0,80 y 1,50.
- Se mejoran resultados y rendimientos en la operación dando una inclinación a los barrenos, respecto a la vertical de 5 a 25 grados.
- Deben de emplearse explosivos muy insensibles a los golpes.
- En general, si se efectúa un taqueado en forma adecuada no deben existir problemas de proyecciones.

La operación de limpieza y remoción con los medios mecánicos, debe tender a unos rendimientos altos y costos mínimos, facilitados con los trabajos de perforación y voladuras.

En algunas ocasiones, como resultado de las voladura, pueden producirse tamaños de rocas de grandes dimensiones, no compatibles con los elementos de caga y transporte, que va a ser utilizados en la obra. Los bloques clasificados como rocas de gran tamaño precisan ser fracturados para su manejo, mediante voladuras secundarias.

Sin embargo, aunque estas rocas de gran tamaño pueden ser generadas en el proceso de voladura primaria, deben de evitarse pues generaran el consumo de recursos y tiempo, incrementado el costo de las voladuras.

El contratista a cargo del proyecto y el subcontratista a cargo del trabajo de voladuras deben de llegar a un acuerdo en la manera en que se manejaran los costos de las voladuras secundarias y revisar el diseño de voladuras para reducir la generación de rocas de gran tamaño.

8.3.3. Voladura secundaria

Existen diversos motivos para llevar a cabo una voladura secundaria o de moneo, cualquiera que sea el motivo, el resultado final es el mismo: una masa grande de roca que debe reducirse. Para llevar a cabo este proceso, existen tres métodos comunes: el empleo de barrenos levantadores, cargas extremas y cargas internas.

8.3.3.1. Barrenos levantadores

Se trata de una técnica que se emplea en rocas de gran tamaño que están parcialmente enterradas en el suelo. Consiste en la detonación de una carga explosiva en un barreno perforado debajo de la roca; la idea es sacarla de la tierra y fracturarla en el intento.

8.3.3.2. Cargas externas

Las cargas externas constituyen una forma rápida pero desordenada de reducir las rocas de gran tamaño. Tiene las ventajas de ser veloces y requerir poco equipo. Por otro lado, las desventajas de este método son el ruido y sobrepresión de aire excesiva, la falta de control en la fragmentación, el desplazamiento lateral a gran velocidad que sucede a veces y la necesidad de utilizar una mayor cantidad de explosivos que en otros métodos.

Las cargas externas son las más eficientes si el explosivo utilizado posee una alta potencia rompedora. Una regla general útil en el cálculo de la cantidad de explosivos necesarios para romper una roca de gran tamaño con una carga externa es utilizar dos libras de explosivo por yarda cúbica de roca (1,2 kilogramos por metro cúbico). La carga se colocaría lo más cerca posible sobre el centro de la masa de la roca. Para colocarla en la posición adecuada, es necesario atar la carga al bloque o sujetarla con alambre.

El experto en explosivos normalmente recomienda el uso de cargas externas, si el trabajo se debe ejecutar de inmediato y el equipo de perforación no se puede conseguir fácilmente, entonces la disyuntiva se da entre la rapidez con la cual se pueden usar las cargas externas, frente a los efectos colaterales

no deseados como sobrepresión de aire, rocas volantes y una fragmentación impredecible.

8.3.3.3. Cargas internas

Las cargas internas son la manera más eficiente y económica de reducir las rocas de gran tamaño. Puesto que las rocas individuales ofrecen múltiples trayectorias de alivio, cantidades relativamente pequeñas de explosivo darán resultados aceptables.

La perforación de las rocas grandes se realiza generalmente con un barreno manual, sea neumático o que funcione con combustible. Los barrenos accionados a gas no tienen tanta potencia como los neumáticos, y mayormente se utilizan en zonas donde se hace difícil, o poco práctica, conseguir una compresora. También puede usarse un barreno de oruga, pero el costo elevado de esta operación, sumado a un mayor tiempo de preparación de cada barreno, reduce la eficacia de la misma.

Se debe de perforar el barreno lo más cerca posible al centro de la masa del bloque de roca. La profundidad del taladro debe ser aproximadamente dos tercios del grosor de la roca. Normalmente, los bloques de hasta 1,5 ó 2,3 metros cúbicos se pueden reducir con un solo barreno siempre y cuando la roca tenga una forma más o menos regular. En caso contrario, se necesitara realizar más de una perforación.

8.3.4. Aflojamiento y fracturación de roca

Cuando tiene lugar una voladura, la roca se fragmenta aumentando de volumen. Esta expansividad tiene especial importancia en el avance, dado que

será el volumen de material a mover hacia el botadero o área donde será reutilizado, si ese fuera el caso. Este aumento del volumen, puede producirse por el aumento de la carga específica.

Es recomendable adecuar el diseño, para que se produzca un volumen de expansión del 15 por ciento de la zona del macizo rocoso, mediante la ejecución de barrenos vacíos. Las limitaciones ambientales, vibraciones, onda aérea y fragmentación a conseguir, condicionan la distribución de barrenos y carga específica.

El grado de fragmentación que se requiere está relacionado directamente al tipo y tamaño del equipo de carga como palas mecánicas y cargadores frontales. El ahorro que se pueda obtener produciendo una fragmentación gruesa se debe sopesar con el mantenimiento adicional de la maquinaria.

Debe entonces utilizarse un diseño de voladura que permita la fragmentación de la roca, en tamaños tales que puedan ser manipuladas por el equipo mecánico de extracción, pero no tan pequeñas que provoquen un aumento en el volumen del material, aumentando también el tiempo de carga y transporte, afectando el avance del proyecto.

Un incremento en el factor de carga mejora la fragmentación a un punto que los costos adicionales de explosivos y perforación, reducen el mantenimiento del equipo de carga dado que manejan tamaños de roca que no llegan al límite máximo de sus capacidades. Un incremento en el costo de perforación y voladura se debe sopesar contra los beneficios de un rendimiento mayor que se obtiene de una fragmentación mejorada.

8.4. Costos directos e indirectos

Los costos de operación para voladuras de roca se definen como aquellos generados en forma continua y que están directamente ligados al volumen de roca requerido, pudiéndose categorizarse en costos directos e indirectos.

Los costos directos también conocidos como costos variables, son los costos primarios en una operación de voladura, en los procesos productivos de perforación, voladura, carga y acarreo y actividades auxiliares de voladura, definiéndose esto en los costos de mano de obra, explosivos, accesorios y mantenimiento de equipos.

Los costos indirectos conocidos como costos fijos, son gastos que se consideran independientes al volumen de roca requerido. Este tipo de costos puede variar en función del nivel de volumen de roca estimado, pero no directamente con el volumen de roca obtenido, como amortizaciones por equipo, intereses por préstamos, seguros e impuestos

8.4.1. Generales

Los costos de perforación y voladura son muy variables de una a otra. Sin embargo existen parámetros bases de análisis, que permiten estimar el costo de la voladura, tales como:

- Costo de equipo y accesorios de barrenación.
- Costo de mantenimiento del equipo de perforación.
- Consumo de Combustibles y grasas.
- Precio de Mano de obra de perforación, (barreneros y ayudantes).
- Precio de explosivos y accesorios.

- Transporte equipo, explosivos y custodia.
- Precio mano de obra del personal técnico para carga de las voladuras.

Los valores estimados de cada uno de los parámetros deben ser integrados, en función del volumen de roca calcula y entonces obtener el costo del metro cúbico volado.

8.4.2. *In situ* (en el sitio)

Los costos generados en el sitio, son aquellos que se originan en función de las condiciones generales de la ubicación del proyecto y que generan gastos propios del lugar, para cubrir las necesidades de personal, equipo y materiales.

- Costo de la alimentación de la mano de obra para la perforación y personal técnico para la ejecución de las voladuras.
- Costo del hospedaje de la mano de obra para la perforación y personal técnico para la ejecución de las voladuras.
- Costo de la alimentación y hospedaje de la custodia.
- Ubicación de distribuidores de insumos (combustible, grasas, etc.), y repuestos para mantenimiento de maquinaria de perforación.
- Ubicación del polvorín más cercano al proyecto para el almacenaje de explosivos y accesorios para la voladura.
- Transporte de equipo de perforación y accesorios de barrenación.

- Transporte del explosivo y accesorios para la voladura.

Debe de analizarse la ubicación y localización de los sitios de voladura para poder estimar los costos generados en el sitio y así integrar estos costos al valor estimado para el proyecto.

8.4.3. Modalidades de precio

Las modalidades de precio de los diferentes insumos para la realización de una voladura están ligadas a los rendimientos que presentan dichos insumos. Los rendimientos tanto de equipo y accesorios de barrenación son estimados por los fabricantes y deben ser obtenidos al momento de la cotización de los mismos, de igual manera sucede con los explosivos y accesorios de voladura.

En el caso de la mano de obra del personal para la perforación y ejecución de la voladura normalmente se estima en función del tiempo de ejecución de los diferentes trabajos, tomando en cuenta de que este personal debe tener la capacitación y experiencia necesaria para cumplir con las metas establecidas, requeridas para el avance efectivo de la voladura.

Generalmente los precios tanto de perforación y voladura pueden ser expresados en Quetzales por metro lineal (Qtz/m) y Quetzales por metro cúbico (Qtz/m³), respectivamente; también puede optarse por la utilización del sistema inglés y expresar dichos precios en Quetzales por pie lineal (Qtz/pie) para la perforación o Quetzales por pie cúbico (Qtz/pie³) para la ejecución de la voladura.

8.5. Modelo de presupuesto

A continuación se presenta un modelo general para la presentación del presupuesto de perforación (tabla XX) y ejecución de voladuras (tabla XXI), para la apertura y ampliación de carreteras con el uso y manejo de explosivos comerciales.

Tabla XX. **Modelo de presupuesto perforación de barrenos para voladura de roca en la apertura y ampliación de carreteras**

INTEGRACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS POR PERFORACIÓN

OFERENTE		ESTACIONAMIENTOS	
PROYECTO	CODIGO:	FECHA OFERTA	
UBICACION		VOLUMEN ESTIMAO DE VOLADURA M ³	

A. PERFORACIÓN DE BARRENOS

DESCRIPCIÓN DEL RENGLON	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
MARCACIÓN DE PLANTILLA Y PERFORACIÓN DE BARRENOS	Metros			

A.1 EQUIPO DE BARRENACIÓN Y ACCESORIOS

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y ACCESORIO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Equipo de de perforación (<i>Trackdrill</i> , Roto martillo, etc.)	Unidad			
Barreno o barra (Diámetro y longitud)	Unidad			
Corona o broca (Tipo, diámetro y material de fabricación)	Unidad			
Acoples Macho (Diámetro)	Unidad			
Acoples Hembra (Diámetro)	Unidad			
Acoples Vástago (Diámetro)	Unidad			
Mangueras (Tipo, resistencia a presión, diámetro).	Unidad			
Compresora (potencia y caudal mínimo de aire).	Unidad			
TOTAL DE EQUIPO DE BARRENACIÓN Y ACCESORIOS				

Continuación de la tabla XX.

A.2 EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

DESCRIPCIÓN DE EQUIPO SEGURIDAD INDUSTRIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Cascos	Unidad			
Lentes	Unidad			
Guantes	Unidad			
Chalecos Refractivos	Unidad			
Botas punta de acero	Unidad			
Extintor				
TOTAL EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL				

A.3 TRANSPORTE, COMBUSTIBLES Y GRASAS

DESCRIPCIÓN TRANSPORTE, COMBUSTIBLES Y GRASAS	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Flete Pick Up, incluye combustible y conductor.				
Flete camión o plataforma (tonelaje), incluye combustible y conductor.	Kilometro			
Combustible para equipo de perforación (Gasolina o Diesel)	Galones			
Combustible para compresora (Gasolina o Diesel)	Galones			
Aceites y lubricantes para motores de equipos de perforación y compresoras	Galones			
Grasas para lubricación de barras	Galones			
TOTAL TRANSPORTE, COMBUSTIBLES Y GRASAS				

A.4 MANO DE OBRA PERSONAL PARA PERFORACIÓN

DESCRIPCIÓN MANO DE OBRA	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Encargado del proyecto	Día			
Operador (Horario de trabajo, cantidad de horas)	Día			
Ayudante (Horario de trabajo, cantidad de horas)	Día			
Hospedaje por noche				
Alimentación (3 tiempos de comida por día)	Unidad			
TOTAL MANO DE OBRA PERSONAL PARA PERFORACIÓN				

A.5 COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE PERFORACIÓN

	TOTAL
TOTAL COSTO DIRECTO (Total costo perforación de barrenos)	
TOTAL COSTO INDIRECTO (Administrativos + finanzas + supervisión + Utilidad)	
TOTAL COSTO DE PERFORACIÓN(SUMA COSTOS DIRECTOS + COSTOS INDIRECTOS)	
TOTAL COSTO POR METRO CUBICO (TOTAL COSTO PERFORACIÓN / VOLUMEN ESTIMADO)	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Modelo de presupuesto ejecución voladura de roca en la apertura y ampliación de carreteras**

INTEGRACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS PARA LA EJECUCIÓN DE VOLADURAS

OFERENTE		ESTACIONAMIENTOS	
PROYECTO	CODIGO:	FECHA OFERTA	
UBICACIÓN		VOLUMEN ESTIMAO DE VOLADURA M ³	

B. EJECUCIÓN DE VOLADURA

DESCRIPCIÓN DEL RENGLON	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
CARGA DE BARRENOS, CONEXIÓN SERIES DE ENCENDIDO Y DETONACIÓN	Metros cúbicos			

B.1 EXPLOSIVOS, ACCESORIOS DE VOLADURA Y EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

DESCRIPCIÓN EXPLOSIVOS, ACCESORIOS Y EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Bajo explosivo "Anfo" (fabricante, densidad y presentación)	Sacos			
Alto Explosivo "Emulsión, Hidrogel, otros." (fabricante, densidad y presentación)	Caja			
Booster (fabricante, características y presentación)	Unidad			
Cordón detonante (fabricante, características y presentación)	Metros			
Mecha Lenta (fabricante, característica y presentación)	Metros			
Detonadores (fabricante, tipo, características y presentación)	Unidad			
Conectores de superficie (fabricante, tipo, características y presentación)	Unidad			
Explosor (fabricante, tipo y características)	Unidad			
Cascos	Unidad			
Lentes	Unidad			
Chalecos refractivos	Unidad			
Guantes	Unidad			
Botas punta de acero	Unidad			
Extintor	Unidad			
TOTAL EXPLOSIVOS, ACCESORIOS DE VOLADURA Y EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL				

B.2 TRANSPORTE, CUSTODIA DE EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS

DESCRIPCIÓN DEL TRANSPORTE Y CUSTORIA	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Flete Pick Up (incluye combustible y conductor)	Kilómetros			
Flete camión o Tráiler (toneladas), (incluye combustible y conductor)	Kilómetros			
Custodia Militar (Según reglamento viaticos de soldados y oficiales)	Día			
TOTAL TRANSPORTE, CUSTORIDA DE EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS				

Continuación de la tabla XXI.

B.3 MANO DE OBRA PERSONAL TÉCNICO PARA LA EJECUCIÓN DE VOLADURAS

DESCRIPCIÓN MANO DE OBRA PERSONAL TÉCNICO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Encargado del proyecto	Día			
Experto en explosivos	Día			
Ayudante	Día			
Hospedaje por noche	Unidad			
Alimentación (3 tiempos de comida al día)	Unidad			
TOTAL MANO DE OBRA PERSONAL TÉCNICO				

B.4 COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LA EJECUCIÓN DE VOLADURAS

	TOTAL
TOTAL COSTO DIRECTO (Total costo ejecución de voladura)	
TOTAL COSTO INDIRECTO (Administrativos + finanzas + supervisión + Utilidad)	
TOTAL COSTO DE VOLADURA (SUMA COSTOS DIRECTOS + COSTOS INDIRECTOS)	
TOTAL COSTO POR METRO CUBICO (TOTAL COSTO DE VOLADURA / VOLUMEN ESTIMADO)	

Fuente: elaboración propia.

Los proyectos de apertura y aplicación de carretera se adjudican por concurso público, las empresas contratistas entonces deben elaborar sus propuestas teniendo en cuenta el equipo necesario, los métodos, el plazo de ejecución y costos, de acuerdo con lo estipulado en las condiciones del concurso.

9. MEDIDAS DE SEGURIDAD ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA DETONACIÓN

9.1. Transporte, manipulación y almacenaje de los explosivos

El empleo de explosivos para obras civiles u otros casos especiales, está normado en todo el mundo por reglamentos específicos en cada país y para algunos casos, como el de transporte marítimo o aéreo internacional, por normas específicas como las de Bruselas (NABANDINA).

En el caso de Guatemala corresponden al Reglamento para la importación, almacenaje y uso de explosivos Acuerdo Gubernativo No. 14-74, con su modificación del Capítulo VII de reglamento Acuerdo Gubernativo No. 13-79; así como a la Ley de Especies Estancadas Acuerdo Gubernativo No. 123-85, con su modificación Viáticos Acuerdo Gubernativo No. 372-94, y también al Reglamento de Actividad Pirotécnica Acuerdo Gubernativo No. 28-2004, documentos en los cuales se señalan los lineamientos que todo usuario debe conocer para el manejo explosivos y que el Ministerio de la Defensa Nacional a través de el Departamento de Especies Estancadas esta en la obligación de facilitar.

Pueden entonces hacerse comentarios generales sobre la manera adecuada del uso de explosivos en cada una de las etapas de manejo.

9.1.1. Transporte de explosivos y detonadores

Es fundamental que en el transporte se reduzcan los riesgos de incendio, detonación y robo. Evitar la manipulación de explosivos y detonadores por personas no autorizadas; su manipulación debe ser efectuada solamente por personal competente con suficiente conocimiento de su uso y manejo. Usar para su transporte solo vehículos en perfectas condiciones, equipados con los banderines, extintores y demás implementos de seguridad requeridos.

Se evitara el maltrato del material por los operarios encargados de carga o descargar el vehículo, los que muchas veces por desconocimiento o apuro arrojan las cajas al suelo o la estivan desordenadamente.

Cualquier detonador o retardo independiente de su construcción es muy sensible al daño mecánico y debe ser tratado con mucho cuidado. Un lineamiento importante a tomar en cuenta es que no se trasportara ni almacenara explosivos junto con iniciadores de ningún tipo.

Durante la carga y descarga de vehículos debe apagarse el motor y solo debe permanecer alrededor el personal autorizado (mínimo 50 metros para cualquier otra actividad).

9.1.2. Almacenaje

Debe de prohibirse almacenar juntos explosivos y detonadores, que deberán guardarse en depósitos independientes y separados a una distancia prudencial, tanto si se trata de polvorines principales como de los auxiliares, debiendo establecerse además que no se almacenaran combustibles ni otros materiales junto con los explosivos. Tampoco deberán efectuarse trabajos de

ninguna clase en los polvorines, aparte de los de traslados y acomodo de material. No debe tenerse juntos el cordón detonante y los detonadores o retardos.

Los polvorines deben ser instalados de tal manera que los explosivos almacenados queden protegidos del fuego, robo y deterioro. El ambiente debe ser seco, limpio y bien ventilado; deben contar con extintores en buenas condiciones, con cerraduras inviolables y con vigilancia efectiva. No se permitirá fumar o hacer fuego en un polvorín o en su alrededor, debiendo tener los avisos de peligro correspondientes.

Teniendo en cuenta que el tiempo afecta a la vida útil de todos los explosivos y accesorios de voladura, es recomendable despachar siempre los lotes más antiguos hasta agotarlos para reponerlos con los más recientes. Para esto es importante llevar un control escrito de despachos, detallado y actualizado.

9.2. Medidas de seguridad en el momento de la detonación

Antes de proceder a la detonación o disparo se deben verificar todos los empalmes y conexiones del tiro, observar que no queden restos de explosivo, accesorios ni herramientas abandonadas y asegurar que todo el personal se haya retirado a un lugar protegido. En superficie comprobar que todos los accesos al área de la voladura queden controlados por vigías debidamente instruidos que deberán permanecer en su lugar hasta después de la voladura.

La proyección de fragmentos volantes representa un serio problema en la voladura superficial, no solo por los hombres que pueden ser impactados y heridos, sino también por los equipos o instalaciones que puedan ser dañados.

La proyección de fragmentos puede originarse por exceso de carga explosiva, falta de taco, roca muy suelta o fisurada, bordo irregular o muy corto, fallas geológicas u oquedades encubiertas, fallas en la perforación o también disparo con tiempos de retardo muy largos entre ellos.

La vibración y onda acústica deben ser tomadas muy en cuenta cuando se trata de obras civiles cercanas a poblaciones o instalaciones industriales ya que serán motivo de reclamos, justificados o no, sobre daños a propiedad ajena.

El encendido y disparo de explosivos debe hacerse por norma en un horario determinado, conocido por todos los trabajadores.

9.3. Recomendaciones de seguridad posteriores a la detonación

Estas recomendaciones comprenden las medidas generales a tomar cuando se presentan fallos como: tiros fallados, tiros retardados, tiros soplados y tiros cortados.

- Esperar un tiempo prudencial antes de acercarse al área de la voladura (usualmente 30 minutos).
- Retirar a todo el personal no necesario o no vinculado al trabajo de eliminación de tiros fallados.
- Dar parte inmediato del problema a todo el personal que trabaja en el sector. Dar instrucciones precisas a los vigías para efectuar una labor coordinada.

- Examinar el frente disparado con cuidado en su totalidad, ubicar los “tacos quemados” (los que detonaron efectivamente), buscar los restos de explosivos y accesorios no explotados entre los escombros de la voladura, recogerlos si es factible y llevarlos a un lugar seguro para eliminarlos.
- Eliminar los tacos quemados con chorro de agua, o colocarles un nuevo cebo y volverlos a disparar.
- Antes que ingrese el equipo de limpieza para cargar el material disparado asegúrese de recoger todo resto de explosivo y accesorios remanentes, ventilar y regar el frente disparado y asegurar los techos o taludes para evitar desprendimientos de la roca.

Después de terminada la operación de limpieza, al iniciarse la nueva perforación se debe asegurar que el personal no vuelva a barrenar en los agujeros de barrenos anteriores aunque no se vea explosivos en ellos.

9.4. Equipamiento de seguridad industrial

Es todo equipo individual o colectivo cuyo objetivo de uso, es salvaguardar la vida y bienestar de toda persona involucrada en los trabajos de campo, para la voladura de roca con el uso de explosivos comerciales.

9.4.1. Protecciones individuales

Es el equipo usado por cada individuo involucrado en los trabajos para la voladura de roca, como protección para cabeza, manos, ojos, oídos, sistema respiratorio, etc.

A continuación se enlista el equipo de seguridad individual básico que debe poseer todo personal involucrado en la perforación y voladura de roca con el uso de explosivos.

- Cascos: para todas las personas que participan en la obra, incluidos los visitantes.
- Guantes de uso general.
- Guantes dieléctricos.
- Media bota de seguridad de cuero.
- Botas dieléctricas.
- Gafas contra impactos y antipolvo.
- Mascarillas antipolvo.
- Protectores auditivos.
- Chalecos reflectantes, etc.

9.4.2. Protecciones colectivas

Son aquellos elementos de protección para todo el personal, como extintores, señalización en áreas peligrosas, etc., cuyo objetivo es el bien común de todos los involucrados.

- Vallas de limitación y protección.
- Señales de tráfico.
- Señales de seguridad.

- Cinta de balizamiento para delimitación del área (rojo-blanco o negro y amarillo).
- Topes de desplazamiento de vehículos.
- Redes, soportes y anclajes.
- Balizamiento luminoso (para señalización nocturna).
- Extintores.
- Tomas de tierra, etc.

Todo personal debe recibir, al ingresar en la obra, una exposición de los métodos de trabajo y los riesgos que esos pudieran entrañar, juntamente con las medidas de seguridad que deberán emplear. El personal mas calificado impartirá auxilios de socorrismo y primeros auxilios, de forma que todos los trabajadores dispongan de algún socorrista.

CONCLUSIONES

1. Las rocas que constituyen macizos rocosos, en bloques monolíticos, más o menos continuos, o separados por accidentes originados por la tectónica: fallas, discontinuidades, juntas, etc., dan lugar a zonas concretas, con propiedades físicas y características geomecánicas comunes, el análisis de factores como peso específico, dureza, tenacidad y resistencia mecánica a la compresión y tensión, permite determinar si es necesaria la utilización de explosivos para la fragmentación.
2. Los explosivos comerciales tienen aplicaciones específicas de acuerdo al tipo, condiciones, dimensión y motivo de una voladura. Entran en consideración las características de la roca, diámetros de perforación, fragmentación deseada, presencia de agua y otros para escoger el más adecuado y económico para cada caso. Entendiéndose como económico no al más barato, sino al que brinde mayor rendimiento, kilogramos de explosivo utilizado en relación a los metros cúbicos de roca (kg/m^3).
3. Los métodos viales para voladuras comprenden: cortes de ladera o a media ladera, cortes de trincheras, voladura para zanjas y voladura para eliminación de raíces y troncos, que se adaptan a las condiciones cambiantes de la geometría y de las propiedades de los macizos rocosos a romper, a lo largo del trazo de la carretera, imponiéndose entonces el diseño de cada voladura como si fuera un caso en particular adaptado al perfil del terreno.

4. La voladura de un macizo rocoso con el uso de explosivos, implica la acumulación de energía elástica y la disipación dinámica de la misma en el trabajo de ruptura de la roca, generando vibraciones en forma de onda, cuya magnitud depende fundamentalmente del factor de carga del explosivo, tiempos de retardo empleados y de la naturaleza de los terrenos atravesados por la vibración.

5. La adquisición del conocimiento para llevar a cabo: la clasificación de la roca, la estimación de volumen del macizo rocoso, el diseño de voladuras y la ejecución de las mismas; es esencial y necesaria, para que el oferente, contratista, delegado residente e ingeniero a cargo de la apertura y/o ampliación de una carretera, puedan realizar un análisis meticuloso de la metodología a utilizar para la ruptura, aflojamiento y fragmentación de la roca, integrado eficientemente el precio de voladuras al costo total del proyecto.

6. La voladura de macizos rocosos requiere de la aplicación correcta de técnicas de perforación y la utilización de explosivos y sus accesorios. Existen limitaciones lógicas, en función de la naturaleza propia del explosivo y del medio sobre el cual este actúa, es pues entonces una operación delicada, que plantea riesgos controlables. Deben cumplirse todas aquellas normas de seguridad que imponen las leyes y los reglamentos, para el almacenaje, manejo, transporte y uso de explosivos comerciales.

RECOMENDACIONES

1. A lo largo del trazo en una carretera se encontrarán macizos rocosos que interfieren con la apertura o ampliación de la misma; deben realizarse estudios geológicos que determinen, las características físicas y geomecánicas de la roca y estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, cuyos resultados justifiquen y ameriten el uso de explosivos comerciales como medio para el aflojamiento y ruptura del estrato de rocoso.
2. El ingeniero civil a cargo de un proyecto vial debe elaborar meticulosamente el programa general de voladuras, para la apertura y/o ampliación de una carretera, identificando las estaciones en donde será necesario utilizar explosivos y las metodologías de perforación y carga para el uso, manejo y transporte de los mismos, así como el volumen de roca estimado para cada tramo del camino asignado para voladura.
3. De acuerdo a las condiciones del terreno será conveniente o necesario delimitar la excavación del corte de un talud, con una hilera de precorte, creando en la masa rocosa un plano de discontinuidad, con el objetivo de evitar sobre excavación y grietas en el talud; obteniendo superficies uniformes.

4. Se impone por parte del contratista, que la empresa subcontratada y/o experto en explosivos cumplan con los reglamentos y leyes que regulan el almacenaje, manejo, transporte y uso de explosivos, a lo largo de su aplicación en la apertura y ampliación de carreteras.
5. Los documentos del contrato entre el contratista y la empresa y/o experto en explosivos subcontratados para el desarrollo de voladuras, debe describir el grueso de la superficie de contacto entre el suelo y la roca tan precisamente como sea posible, fijar claramente los límites y medidas de pago para cada material, así como determinar, los registros, las atribuciones, obligaciones y responsabilidades de cada una de las partes involucradas en el control y ejecución de voladuras.
6. El contratista que de acuerdo a los renglones de trabajo y sus cantidades, así como de las condiciones geológicas presentadas, requiera utilizar explosivos, debe exigir a la empresa subcontratada y/o experto en explosivos, realizar voladuras o explosiones de prueba con el objetivo de minimizar impactos negativos.
7. En las etapas para la ejecución de voladuras se requiere la aplicación de medidas de seguridad y control de riesgos, relativas a la naturaleza propia del explosivo y medio sobre que actúa; todo involucrado debe tener presente que los accidentes ocurren inesperadamente, pero que son previsibles, que la capacitación constante y adecuada del personal participante, es condición indispensable para la seguridad.

8. La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y el Colegio de Ingenieros de Guatemala, deben tomar un roll activo en la capacitación de ingenieros civiles, en gerencia para la utilización de explosivos. Es necesaria la estructuración e implementación de un diplomado, para los ingenieros que tengan a su cargo proyectos en los cuales sea requerido el almacenamiento, manejo, transporte y uso de explosivos comerciales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASA Organización Industrial. *Manual de explosivos*. México: ASA, 2010. 30 p.
2. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Vías de comunicación*. 4a ed. México: Limusa, 2007. 736 p.
3. Dirección de Caminos. *El arte del trazo de carreteras*. 2a ed. Perú: Ministerio de Fomento y Obras Públicas, 1965. 207 p.
4. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2001. 1200 p.
5. Du Pont Company. *Blasters handbook*. 16a ed. Estados Unidos: Du Pont, 1980. 494 p.
6. Ejecito de Guatemala, Departamento de Especies Estancadas. *Leyes y reglamentos para la administración de material calificado como especie estancada*. Guatemala: Ministerio de la Defensa Nacional, 2007. 46 p.
7. EMULGEL Explosivos de Norteamérica. *Seminario sobre el funcionamiento y tipos de explosivos*. México: EMULGEL, 1998. 12 p.

8. EXSA explosivos. *Manual práctico de voladura*. Perú: EXSA, 2002. 331 p.
9. GUEVARA UTRILLA, Francisco Luis. *Estudio y calculo de los elementos básicos para el diseño de carreteras*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1964. 146 p.
10. ICI explosivos USA. *Blaster's Handy tables and guidelines*. Estados Unidos: ICI, 2003. 19 p.
11. _____. *Seminario sobre el uso y manejo de explosivos*. Guatemala: ICI, 2003. 81 p.
12. Institute of Makers of Explosives. *Avisos e instrucciones para transporte y usos de materiales explosivos*. Estados Unidos: Ensign-Bickford, 1997. 78 p.
13. International Society of Explosives Engineers. *Manual del especialista en voladura*. 17a ed. Estados Unidos: Hopler, 2008. 671 p.
14. KONYA, Calvin J. *Diseño de voladuras*. México: Cuicatl, 2008. 252 p.
15. Maya Químicos. *Catálogo de productos*. Guatemala: Maquisa, 2011. 8 p.
16. _____. *Presentación medidas de seguridad en el uso de explosivos*. Guatemala: Maquisa, 2011. 15 p.

17. Ministerio de la Defensa Nacional. *Manual de explosivos y demoliciones*. Guatemala: Centro de Estudios Militares, 1974. 111 p.
18. Ministerio de Obras Publicas y Transportes. *Manual para el control y diseño de voladura en obras de carreteras*. España: Dirección General de Carreteras, 2010. 390 p.
19. ORICA Servicios de Minería. *Manual de consulta para el usuario*. México: ORICA, 2011. 20 p.
20. SARUMAGA Tecnología Moderna de Voladuras. *Presentación características y propiedades de los explosivos*. Guatemala: SARUMAGA, 2007. 28 p.
21. _____. *Programa de seguridad y manejo de explosivos proyecto Fray Bartolomé-Campur*. Guatemala: SARUMAGA, 2002. 12 p.
22. Secretaria de Integración Económica Centroamericana. *Manual centroamericano de especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales*. Centroamérica: SIECA, 2001, 1500 p.
23. SOWERS, George B. *Introducción a mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa, 1975. 677 p.
24. VIDES TOBAR, Armando. *Construcción de carreteras*. Vols. 1 y 2. Guatemala: Piedra Santa, 1981. 1047 p.

